MIODRAG HAMOVIĆ, profesor

LINE ROBOT

ELEKTRIČNE MAŠINE

ZA III I IV RAZRED ELEKTROTEHNIČKE STRUKE

I izdanje

„SVJETLOST“,
OOUR Zavod za udžbenike i nastavna sredstva,
Sarajevo, 1989.

Odgovorni urednik
mr MUHAMED SARAJLIĆ

Recenzenti
dr DOBRIVOJE MENJIĆ, dipl. el. inž.,
redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Tuzli

ŠEVKO BULJKO, dipl. el. inž.,
Elektromašinski centar, Elektrotehnička škola Mostar

ĐURO ZMIJANJAC, dipl. el. inž.,
Željezničko-transportna organizacija Bihać

Lektor
ANĐA VLAŠKI

Naslovna strana
MUSA REHIĆ

Ilustrator
STJEPAN BZIK

Tehnički urednik
RUŽICA RIOROVIĆ

Korektor
BRANISLAVA VARIĆAK

Izdaje: „Svjetlost", OOUR Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Sarajevo

Za izdavača:
ABDUSELAM RUSTEMPAŠIĆ

Tiraž: 2 500 primjeraka

Štampa:
Birografika — Subotica

Za štampariju
Petar inž. Popović

Pedagoški savjet Bosne i Hercegovine odobrio je izdavanje i upotrebu ovog priručnika odlukom broj 07-238/89. od 16. maja 1989. godine.

CIP — Katalogizacija u publikaciji
Narodna i univerzitetska biblioteka Bosne i Hercegovine Sarajevo

621.3(075.3)

HAMOVIĆ, Miodrag

Električne mašine : za III i IV razred elektrotehničke struke / Miodrag Hamović ; [ilustrator Stjepan Bzik]. — 1. izd. — Sarajevo : Svjetlost, 1989. — 300 str. : ilustr. ; 25 cm

ISBN 86-01-02400-9

ISBN 86-01-**02400**-9

SADRŽAJ

TRANSFORMATORI

1.1 FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD TRANSFORMATORA 9
1.1.1 Pojam, svrha i primjena transformatora 9
1.1.2 Princip rada transformatora 10
1.1.3 Odnos transformacije. Indukovani napon po navoju i namotaju 12
1.1.4 Približna konstantnost magnetskog toka, magnetske indukcije, magnetskog napona i gubitaka snage u željezu 14

1.2 PRAZAN HOD TRANSFORMATORA 15
1.2.1 Metode proučavanja rada transformatora 15
1.2.2 Način rada u praznom hodu 16
1.2.3 Vektorski dijagram praznog hoda 17
1.2.4 Odnosi napona u praznom hodu 18
1.2.5 Gubici snage u praznom hodu 18
1.2.6 Pokus praznog hoda 19

1.3 KRATAK SPOJ TRANSFORMATORA 20
1.3.1 Način rada u kratkom spoju 20
1.3.2 Napon kratkog spoja 21
1.3.3 Gubici snage u kratkom spoju 22
1.3.4 Odnosi napona i struja u kratkom spoju 22
1.3.5 Reduciranje (svođenje) električnih veličina sa sekundara na primar 24
1.3.6 Vektorski dijagram reduciranog transformatora u kratkom spoju 25
1.3.7 Pokus kratkog spoja 25

1.4 TRANSFORMATOR OPTEREĆEN 27
1.4.1 Način rada opterećenog transformatora 28
1.4.2 Odnosi napona i struja opterećenog transformatora 28
1.4.3 Vektorski dijagram opterećenog transformatora 30
1.4.4 Kapov dijagram 31
1.4.5 Gubici snage i stepen korisnog djelovanja 33

1.5 KONSTRUKTIVNA IZVEDBA TRANSFORMATORA 35
1.5.1 Magnetsko kolo (jezgra) transformatora 36
1.5.2 Namotaji transformatora 40
1.5.3 Pomoćni dijelovi transformatora 43
1.5.4 Hlađenje transformatora 46

1.6 TROFAZNI TRANSFORMATORI 50
1.6.1 Trofazna transformacija 50
1.6.2 Načini spajanja i označavanja namotaja trofaznih transformatora 52
1.6.3 Grupe spajanja namotaja trofaznih transformatora 55
1.6.4 Simetrično i nesimetrično opterećenje 60
1.6.5 Paralelni rad transformatora 61
1.6.6 Regulacija napona transformatora 65

1.7 POSEBNE VRSTE TRANSFORMATORA ... 69
1.7.1 Autotransformatori ... 70
1.7.2 Tronamotni transformator ... 73
1.7.3 Transformator za zavarivanje ... 74
1.7.4 Mjerni transformatori ... 76

ASINHRONE MAŠINE

2.1 ELEKTRIČNO I MAGNETNO KOLO OBRTNIH ELEKTRIČNIH MAŠINA ... 85
2.1.1 Osnovni pojmovi ... 85
2.1.2 Vrste induktora ... 86
2.1.3 Osnovni pojmovi i pravila o izvođenju namotaja ... 91
2.1.4 Elementi, vrste i prikazivanje namotaja ... 94
2.1.5 Namotaji s odijeljenim pojasevima ... 99
2.1.6 Namotaji s mješovitim pojasevima ... 106
2.1.7 Magnetni tok namotaja jedne faze ... 108
2.1.8 Obrtno magnetno polje ... 110

2.2 FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD ASINHRONIH MOTORA ... 113
2.2.1 Pojam, svrha i primjena asinhronih motora ... 113
2.2.2 Princip rada asinhronog motora ... 114
2.2.3 Klizanje asinhronog motora ... 115
2.2.4 Približna konstantnost obrtnog magnetskog toka, magnetne indukcije i gubitaka snage u željezu statora ... 117
2.2.5 Inducirani napon, frekvencija i gubici snage u željezu rotora ... 118
2.2.6 Gubici snage u bakru rotora ... 119
2.2.7 Stepen korisnog djelovanja asinhronog motora ... 120

2.3 ASINHRONA MAŠINA SA ZAKOČENIM (MIRUJUĆIM) ROTOROM ... 122
2.3.1 Prazan hod asinhrone mašine sa zakočenim rotorom ... 122
2.3.2 Kratak spoj asinhrone mašine sa zakočenim rotorom ... 124
2.3.3 Primjena asinhrone mašine sa zakočenim rotorom ... 125

2.4 POJAVE, SVOJSTVA I KARAKTERISTIKE ASINHRONIH MOTORA U POGONU ... 127
2.4.1 Prazan hod asinhronog motora ... 127
2.4.2 Asinhroni motor pod opterećenjem ... 128
2.4.3 Obrtni (zakretni) momenat asinhronog motora ... 128
2.4.4 Stabilnost rada asinhronog motora u pogonu ... 130
2.4.5 Radne karakteristike asinhronog motora ... 132
2.4.6 Kružni dijagram asinhronog motora ... 133

2.5 KONSTRUKTIVNA IZVEDBA ASINHRONIH MOTORA ... 138
2.5.1 Stator ... 139
2.5.2 Rotor ... 141
2.5.3 Pomoćni dijelovi asinhronog motora ... 143

2.6 PUŠTANJE ASINHRONIH MOTORA U RAD ... 145
2.6.1 Puštanje u rad asinhronih motora s kliznim prstenovima ... 146
2.6.2 Puštanje u rad asinhronih motora s kratkospojenim rotorom ... 147
2.6.3 Asinhroni motori s kratkospojenim rotorom specijalne izvedbe sa poboljšanim karakteristikama pri puštanju u rad ... 151

2.7 REGULACIJA ILI PROMJENA BRZINE OKRETANJA ASINHRONIH MOTORA ... 154
2.7.1 Regulacija brzine okretanja promjenom napona mreže ... 155
2.7.2 Regulacija brzine okretanja promjenom aktivnog otpora u kolu namotaja rotora ... 155
2.7.3 Regulacija brzine okretanja promjenom frekvencije mreže ... 156
2.7.4 Regulacija brzine okretanja promjenom broja pari polova ... 157
2.7.5 Promjena smjera okretanja asinhronog motora ... 159

2.8 JEDNOFAZNI ASINHRONI MOTOR ... 160
2.8.1 Način rada jednofaznog asinhronog motora ... 161
2.8.2 Puštanje u rad jednofaznog asinhronog motora ... 162
2.8.3 Rad trofaznog asinhronog motora kao jednofaznog ... 165

MAŠINE ZA ISTOSMJERNU STRUJU

3.1 FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD MAŠINA ISTOSMJERNE STRUJE ... 169
3.1.1 Istorijski razvoj, sadašnja primjena i daljnja perspektiva ... 169
3.1.2 Generatorski rad mašine ... 170
3.1.3 Motorski rad mašine ... 174
3.1.4 Jednačine osnovnih veličina mašina istosmjerne struje ... 176

3.2 KONSTRUKTIVNA IZVEDBA MAŠINA ISTOSMJERNE STRUJE ... 181
3.2.1 Dijelovi mašina istosmjerne struje ... 181
3.2.2 Namotaji mašina istosmjerne struje ... 185

3.3 VRSTE I OSOBINE GENERATORA ISTOSMJERNE STRUJE ... 197
3.3.1 Pojam i način pobuđivanja ... 197
3.3.2 Vrste generatora istosmjerne struje ... 197
3.3.3 Osobine generatora istosmjerne struje ... 197
3.3.4 Generator sa nezavisnom pobudom ... 198
3.3.5 Generator sa paralelnom pobudom ... 200
3.3.6 Generator sa serijskom pobudom ... 202
3.3.7 Generator sa složenom pobudom ... 203

3.4 VRSTE I OSOBINE MOTORA ISTOSMJERNE STRUJE ... 204
3.4.1 Vrste motora istosmjerne struje ... 204
3.4.2 Osobine motora istosmjerne struje ... 205
3.4.3 Motor sa paralelnom pobudom ... 205
3.4.4 Motor sa serijskom pobudom ... 206
3.4.5 Motor sa složenom pobudom ... 208
3.4.6 Puštanje (pokretanje) motora istosmjerne struje u rad ... 209
3.4.7 Regulacija brzine okretanja motora istosmjerne struje ... 213
3.4.8 Promjena smjera okretanja motora istosmjerne struje ... 215

3.5 RAD I ZBIVANJA U MAŠINAMA ISTOSMJERNE STRUJE ... 216
3.5.1 Magnetna reakcija armature rotora ... 217
3.5.2 Komutacija ... 220
3.5.3 Sredstva za sprečavanje štetnog djelovanja magnetne reakcije rotora i loše komutacije ... 223
3.5.4 Gubici snage i stepen korisnog djelovanja u mašinama istosmjerne struje ... 226

3.6 SPECIJALNE MAŠINE ZA ISTOSMJERNU STRUJU ... 229
3.6.1 Istosmjerne mašine sa poprečnim magnetnim tokom ... 230

KOLEKTORSKE MAŠINE ZA NAIZMJENIČNU STRUJU I PRETVARAČI

4.1 JEDNOFAZNI KOLEKTORSKI MOTORI NAIZMJENIČNE STRUJE ... 235
4.1.1 Potreba za kolektorskim motorima naizmjenične struje ... 235
4.1.2 Jednofazni serijski kolektorski motor ... 235
4.1.3 Univerzalni kolektorski motor ... 239
4.1.4 Repulzioni motor ... 240

4.2 PRETVARAČI ... 241
4.2.1 Jednoarmaturni pretvarač ... 241

SINHRONE MAŠINE

5.1 FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD SINHRONIH MAŠINA 245

5.1.1 Značaj sinhronih mašina u elektroprivredi 245
5.1.2 Način rada sinhronog generatora 246
5.1.3 Generatorski i motorski režim rada 248
5.1.4 Indukovani napon u jednom faznom namotaju statora sinhronog generatora 251
5.1.5 Magnetni naponi rotora i statora 253
5.1.6 Magnetni tokovi 254
5.1.7 Magnetna reakcija armature statora (indukta) 255

5.2 KONSTRUKTIVNA IZVEDBA SINHRONIH GENERATORA 259

5.2.1 Stator 259
5.2.2 Rotor 261
5.2.3 Hlađenje sinhronih generatora 264

5.3 VEKTORSKI DIJAGRAMI I KARAKTERISTIKE SINHRONIH GENERATORA 267

5.3.1 Promjena napona pri opterećenju sinhronog generatora 267
5.3.2 Uopšte o karakteristikama sinhronog generatora 268
5.3.3 Karakteristika praznog hoda 269
5.3.4 Vanjska karakteristika 269
5.3.5 Karakteristika regulacije 271
5.3.6 Gubici snage i stepen korisnog djelovanja 272

5.4 PARALELNI RAD SINHRONIH GENERATORA 274

5.4.1 Opšte napomene 274
5.4.2 Uslovi za paralelan rad 275
5.4.3 Sinhronizacija pomoću sinhronizacionih sijalica 275
5.4.4 Sinhronizacija pomoću sinhronoskopa 277
5.4.5 Samosinhronizacija 278

5.5 SINHRONI MOTORI 279

5.5.1 Opšte osobine i primjena sinhronih motora 279
5.5.2 Način rada 280
5.5.3 Puštanje sinhronih motora u rad 280
5.5.4 Sinhroni (fazni) kompenzator 282

ELEKTROMOTORNI POGONI I ELEKTRIČNA VUČA

6.1 ELEKTROMOTORNI POGONI 285

6.1.1 Opšte o elektromotornim pogonima 285
6.1.2 Karakteristične osobine radnih mehanizama 286
6.1.3 Karakteristične osobine elektromotora 287
6.1.4 Sklopovi elektromotornih pogona 288
6.1.5 Izbor motora 290

6.2 ELEKTRIČNA VUČA 292

6.2.1 Opšte o električnoj vuči 292
6.2.2 Podjela električne vuče prema mjestu izvora energije 292
6.2.3 Vrsta vozila 293
6.2.4 Sistemi električne vuče kod željeznice 296

LITERATURA 299

PREDGOVOR

ELEKTRIČNE MAŠINE za III *i* IV *razred elektrotehničke struke pisane su prema važećem Nastavnom planu i programu stručnog obrazovanja za obrazovne profile:*

— *tehničar elektroenergetike (IV stepen stručnosti)*

— *elektromehaničar (III stepen stručnosti) i*

— *elektroenergetičar (III stepen stručnosti).*

Pošto su planovi i programi za ovaj nastavni predmet različiti za sva tri profila, prilikom pisanja udžbenika nastojao sam da udovoljim i programu električnih mašina koji se izučava u III i IV razredu sa 3+2 časova sedmično (tehničar elektroenergetike), kao i programima koji se izučavaju samo u trećem razredu sa tri, odnosno dva časa sedmično.

Tako npr. materiju transformatora tehničari izučavaju 45 časova sedmično, elektromehaničari 30 časova, a elektroenergetičari je izučavaju 20 časova sedmično. Za ova dva profila trećeg stepena nastavnik neće ulaziti dublje u teoriju transformatora, ali će zato detaljno obraditi njegovu konstruktivnu izvedbu, spojeve, primjenu itd. To isto vrijedi i za asinhrone mašine, s tim što se poglavlje o električnim i magnetnim kolima obrtnih mašina neće obrađivati za profile trećeg stepena, ali će se podrobno objasniti pravila o izvođenju višefaznih namotaja, konstruktivna izvedba i načini puštanja u rad asinhronih motora. Poglavlje istosmjernih mašina sa poprečnim tokom, poglavlja kolektorskih mašina za naizmjeničnu struju i pretvarače kao i elektromotorni pogoni i električna vuča neće se obrađivati sa učenicima obrazovnog profila trećeg stepena stručnosti.

Da bi se nastavniku, a posebno učenicima koji se spremaju za treći stepen stručnosti, bilo lako koristiti ovim za njih, u odnosu na program obimnijim udžbenikom, iznad teksta nalazi se upozorenje: „Neobavezno za treći stepen stručnosti". Na kraju neobaveznog dijela teksta nalaze se tri zvjezdice.

Ukoliko negdje u udžbeniku teme nisu poredane onako kako je u programu i ako se neke teme nađu u udžbeniku, a ne nalaze se u programu, to je zbog logičkog slijeda i cjeline materije iz pojedinih oblasti.

Ovom prilikom želim da se zahvalim recenzentima Đuri Zmijanjcu, dr Dobrivoju Menjiću i Ševki Buljku koji su svojim korisnim primjedbama i prijedlozima doprinijeli da ovaj udžbenik bude još bolji.

Unaprijed se zahvaljujem svima koji mi na bilo koji način ukažu na propuste i greške.

Sarajevo, marta 1989. *godine* *Autor*

TRANSFORMATORI

1.1. FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD TRANSFORMATORA

1.1.1. Pojam, svrha i primjena transformatora

Transformator (od latinske riječi *transformare*, što znači preobraziti) je električna mašina bez pokretnih dijelova koja služi da se naizmjenična struja jednog električnog kola pretvori u naizmjeničnu struju drugog električnog kola iste frekvencije, ali obično druge vrijednosti napona i jačine struje. Pošto su dijelovi od kojih je sastavljen transformator nepokretni jedan u odnosu na drugi, često se ova mašina naziva *statička električna mašina*.

Transformator je, znači, naprava koja preobražava električnu energiju jednog napona i struje u električnu energiju drugog napona i struje. On služi da se po volji ekonomično promijeni napon, tj. poveća ili smanji njegova vrijednost. Ako se napon podiže, struja smanjuje svoju vrijednost, ili obratno, smanjenjem napona, vrijednost struje postaje veća, pri čemu snaga transformatora ostaje približno ista.

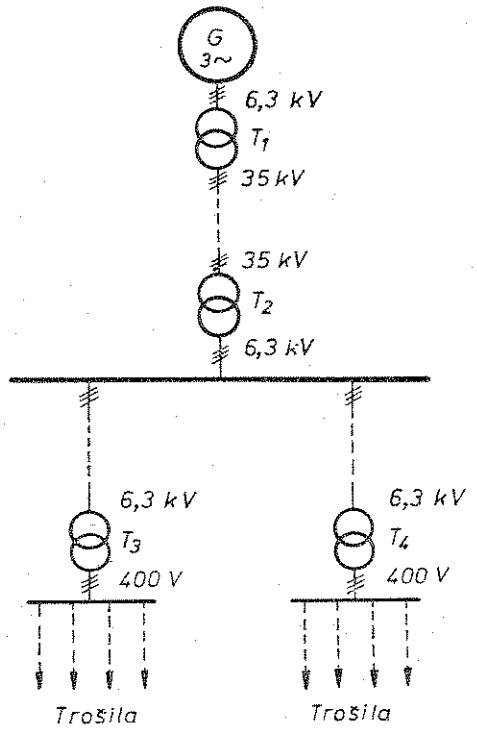
Pri prenošenju električne energije vodovima na velike udaljenosti (a to je gotovo redovit slučaj), transformatori imaju veoma važnu ulogu. Oni omogućavaju da električna energija bude pod visokim naponom i sa relativno malom strujom prenešena na veoma veliku udaljenost. To je potrebno da bi gubitak električne snage u vodu, koji je srazmjeran sa kvadratom struje, bio što manji.

U hidro i termoelektranama generatori proizvode električnu energiju obično pod naponom od 6,3 do 16,5 kV. Kada bismo morali bez transformatora prenijeti električnu energiju pod ovim naponom, vodovima bi tekle struje velikih vrijednosti koje bi uzrokovale velike gubitke snage i padove napona. Iz toga proizlazi da je zadatak transformatora koji se postavlja u elektrani da podiže generatorski napon na potrebnu visinu (110, 220 i 400 kV), pa se energija pod tim naponom prenosi na daljinu.

Na kraju voda postavlja se drugi transformator koji spušta napon. Tako je omogućena brza, kvalitetna i ekonomična snabdjevenost električnom energijom svakog trošila, npr. u domaćinstvu, industriji, poljoprivredi itd.

Na sl. 1.1. prikazana je jednopolna šema prenosa električne energije od proizvođača do trošila. U hidroelektrani (npr. „Jablanica") generator proizvodi električnu energiju pod naponom 6,3 kV. Transformator T_1 koji se nalazi u sastavu elektrane podiže generatorski proizvedeni napon sa 6,3 kV na 35 kV. Pod ovim visokim napo-

nom električna energija se vodovima prenosi do blizine miesta potrošnje, u našem slučaju do transformatora T_2 koji se nalazi u Blažuju. Pri tome se struja u prenosnom vodu smanjila u odnosu na struju u električnom kolu generatora za toliko puta za koliko se povećao napon. Transformator T_2 spušta ponovo napon na generatorski, tj. na 6,3 kV. Pod ovim naponom električna energija se dovodi do pojedinih naselja (Grbavica, Hrasno) gdje se pomoću transformatora T_3 i T_4 ponovo vrši transformacija, tj. napon se spušta na upotrebni od 400 V.



Sl. 1.1. Uloga i značaj transformatora u prenosu i raspodjeli električne energije

Ovaj primjer se pokazuje da smo transformaciju električne energije vršili tri puta, što je najčešći slučaj, mada je nekada potrebno transformaciju vršiti i više puta.

Osim ove glavne uloge u prenosu i raspodjeli električne energije, transformatori se primjenjuju kao pomoćne naprave za puštanje u rad asinhronih motora, za mjerenje napona i struja (naponski i strujni transformatori), za regulaciju napona u razdjelnim mrežama (indukcioni regulatori), u specijalne svrhe, npr. za električne peći, za električno varenje, ispravljačke uređaje, u medicinske svrhe itd. Naročito je široka primjena u tehnici slabe struje, počev od najjednostavnijeg, nama svima poznatog telefonskog aparata do složenijih uređaja (radio, televizor, radio-relejni uređaji, uređaji u telefoniji itd.).

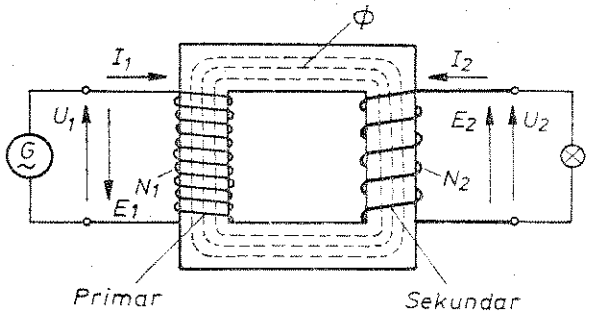
Kako se vidi, područje primjene transformatora veoma je široko, pa otuda i mnogo konstruktivnih oblika transformatora. No, u svim slučajevima, osnovne pojave koje se događaju u transformatorima i koje određuju njihov rad u suština su iste. Ubuduće, kada budemo govorili o transformatorima, imaćemo u vidu osnovni tip, tj. jednofazni, odnosno trofazni energetski transformator.

1.1.2. **Princip rada transformatora**

Najjednostavniji transformator sastoji se od dva odvojena namotaja koji su tijesno induktivno povezani (sl. 1.2). Čvrsta induktivna veza postiže se smještajem oba namotaja na zajedničku željeznu jezgru koja treba da ima oblik što boljeg zatvorenog magnetskog kola. Namotaj priključen na generator, odnosno električni

izvor naizmjenične struje naziva se *primar*, što znači prvi, glavni, a namotaj na koga su priključena trošila zove se *sekundar*, što znači drugi, sporedni.

Rad transformatora zasniva se na pojavi *elektromagnetske indukcije*. Ako primarni namotaj priključimo na električni izvor naizmjeničnog napona U_1, onda će tim namotajem poteći naizmjenična struja koja stvara magnetski tok Φ. Taj tok



Sl. 1.2. Principijelna shema najjednostavnijeg jednofaznog transformatora

prolazi kroz oba namotaja transformatora i međusobno ih veže elektromagnetski. On je nerazdvojivo vezan za struju, tj. postoji dok ona teče, raste i opada zajedno s njom i iščezava kada struje nestane. Znači, magnetski tok Φ javlja se kao posljedica struje, a zavisi još od magnetske provodnosti sredine kroz koju prolazi (željezna jezgra). Pošto je primarna struja promjenljiva, i magnetski tok će biti promjenljiv. Kao posljedica toga, u navoju (zavoju) koji ga obuhvata indukovaće se napon srazmjeran ne sa vrijednošću samog toka, nego sa brzinom njegove promjene

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad \ldots\ldots (1.1)$$

Prema Lencovom zakonu indukovani napon teži da stvori indukovanu struju takvog smjera koja se svojim magnetskim djelovanjem protivi uzroku koji ju je izazvao, tj. protivi se promjeni magnetskog toka. Zato je njegova vrijednost srazmjerna sa negativnom vrijednošću brzine promjene toka.

Napon indukovan u namotajima transformatora proporcionalan je broju navoja svakog pojedinog namotaja. Ako brojeve navoja primarnog i sekundarnog namotaja označimo sa N_1 i N_2, onda će vrijednost indukovanog napona primarnog namotaja E_1 i indukovanog napona sekundarnog namotaja E_2 biti:

$$E_1 = -N_1\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad \ldots\ldots (1.2)$$

$$E_2 = -N_2\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad \ldots\ldots (1.3)$$

Indukovani napon koji je nastao u primarnom namotaju pod uticajem promjene magnetskog toka nazivamo *indukovani napon samoindukcije*. Po Lencovom zakonu on se protivi uzroku struje, naponu dovedenom na stezaljke primarnog

namotaja i sa njim će biti u ravnoteži. To je, dakle, *indukovani protunapon primara* koji više nego otpori u primarnom namotaju ograničava primarnu struju.

I kada je njegovo kolo otvoreno, za vrijeme promjene magnetskog toka, u sekundarnom namotaju uvijek postoji indukovani napon koji nazivamo *indukovani napon međusobne indukcije*. Kada sekundarno kolo zatvorimo preko nekog trošila npr. sijalice, njegovim namotajem poteče struja pod uticajem ovog indukovanog napona. Ona će po Lencovom zakonu imati u svakom momentu takav smjer da će stvoriti magnetski tok suprotan onom u željeznoj jezgri, pa će radi održanja transformacije primarni namotaj iz izvora na koji je priključen povući toliko veću struju da se magnetski tok u jezgri ne okrnji, tj. da se zadrži u prvobitnom stanju. Prema tome, indukovanim putem došlo je do transformacije električne energije koju smo doveli u primarni namotaj u električnu energiju koju iskorištavamo u trošilu.

1.1.3. **Odnos transformacije. Indukovani napon po navoju i namotaju**

Kada je sekundarni namotaj otvoren ($I_2=0$), a kroz primarni namotaj teče struja, jasno je da se magnetski tok Φ javlja jedino pod uticajem primarne struje. On se mijenja po harmoničnom zakonu, tj. njegove promjene su sinusoidalne, i kao takav indukuje u svakom navoju kroz koji prodire napon koji je također harmonična funkcija vremena. Prema tome, efektivna vrijednost indukovanog napona jednog navoja iznosi:

$$E=4{,}44\,f\,\Phi_m, \qquad \ldots\ldots\ (1.4)$$

gdje f označava frekvenciju, a Φ_m maksimalnu vrijednost magnetskog toka koja iznosi $\Phi_m=B_m S_{Fe}$. B_m predstavlja maksimalnu vrijednost gustine magnetskog toka, odnosno magnetske indukcije, a S_{Fe} čist presjek željeznih limova kroz koji magnetski tok prodire.

Magnetski tok, kako smo već kazali, je zajednički, jer prodire i kroz primarni i kroz sekundarni namotaj. Prema tome, u svakom navoju, pripadao on primaru ili sekundaru, zajednički tok indukuje isti napon:

$$e_1=e_2=E \qquad \ldots\ldots\ (1.5)$$

Pošto smo već sa N_1 označili broj navoja primara, onda će u njemu indukovani napon biti:

$$E_1=E\,N_1 \qquad \ldots\ldots\ (1.6)$$

Ovaj indukovani napon E_1 po Lencovom zakonu, kako smo već kazali, biće suprotan naponu mreže U_1, pod čijim se uticajem javila struja u primaru. To je, dakle, protunapon. On se razlikuje od primarnog napona za vrijednost omskog i induktivnog pada napona u namotaju primara. U normalnim okolnostima (od praznog hoda do nominalnog opterećenja) oba pada napona skupa iznose samo nekoliko postotaka napona, pa je:

$$E_1\approx U_1 \qquad \ldots\ldots\ (1.7)$$

Analogno prethodnom, u namotaju sekundara koji se sastoji od N_2 broja navoja stvara se indukovani napon

$$E_2=E\,N_2 \qquad \ldots\ldots\ (1.8)$$

Ovaj indukovani napon E_2 je uzrok struje u kolu sekundarnog namotaja ako je ono zatvoreno. Napon na krajevima sekundara U_2 razlikuje se od indukovanog napona E_2 za vrijednost omskog i induktivnog pada napona u namotaju sekundara. Pri nominalnom opterećenju padovi napona iznose samo koji postotak sekundarnog napona, pa je:

$$E_2\approx U_2 \qquad \ldots\ldots\ (1.9)$$

Pošto zajednički magnetski tok Φ indukuje isti napon E u svakom navoju, pripadao on primaru ili sekundaru, jasno je da će odnos zajedničkog indukovanog napona primara E_1 i zajedničkog indukovanog napona sekundara E_2 biti stalan i jednak odnosu brojeva navoja:

$$k=\frac{E_1}{E_2}=\frac{E\,N_1}{E\,N_2}=\frac{4{,}44\,f\,\Phi_m N_1}{4{,}44\,f\,\Phi_m N_2}=\frac{N_1}{N_2},\ \text{odnosno}$$

$$k=\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2} \qquad \ldots\ldots\ (1.10)$$

Odnos brojeva navoja $\frac{N_1}{N_2}=k$ naziva se *odnos transformacije* ili *prenosni odnos transformatora*. Broj k pokazuje da li transformator podiže ili spušta napon. Ako je odnos transformacije veći od jedinice, onda se radi o transformatoru koji spušta napon, a ako je odnos manji od jedinice, onda je to transformator koji podiže napon.

Kod nominalnih opterećenja padovi napona su vrlo mali, pa možemo kazati da su $E_1\approx U_1$ i $E_2\approx U_2$, odnosno

$$\frac{U_1}{U_2}\approx\frac{N_1}{N_2} \qquad \ldots\ldots\ (1.11)$$

Kako se vidi, naponi na stezaljkama primara i sekundara u srazmjernom su odnosu s brojem navoja. To znači da se prikladnim odabiranjem broja navoja može od bilo kojeg napona na primaru dobiti željeni napon na sekundaru. Jednostavno rečeno, namotaj koji ima više navoja ima veći napon i obratno.

Kod nominalnih opterećenja transformatora možemo zanemariti gubitke čije su vrijednosti zaista male u odnosu na dovedenu snagu primarnom namotaju. Činimo samo malu pogrešku (do 4%) kada stavimo da je snaga primarnog namotaja približno jednaka snazi namotaja sekundara.

$$U_1 I\cos\varphi_1\approx U_2 I_2\cos\varphi_2 \qquad \ldots\ldots\ (1.12)$$

Kao što ćemo kasnije vidjeti, faktori snage sa primarne i sekundarne strane se pri nominalnom opterećenju vrlo malo razlikuju, pa ih možemo izjednačiti:

$$\cos\varphi_1\approx\cos\varphi_2.$$

Tada je:

$$U_1 I_1\approx U_2 I_2 \qquad \ldots\ldots\ (1.13)$$

Što znači da su *prividne snage primarnog i sekundarnog namotaja približno jednake*.

Prebacivanjem napona na jednu stranu, a struje na drugu stranu jednačine i uz primjenu jednačine (1.11), dobivamo:

$$\frac{U_1}{U_2}\approx\frac{N_1}{N_2}\approx\frac{I_2}{I_1} \qquad \ldots\ldots\ (1.14)$$

Iz formule nije teško zaključiti da se *naponi primara i sekundara odnose srazmjerno prema njihovim brojevima navoja, a da su u obrnutom odnosu prema njihovim strujama.* Drugim riječima kazano, ukoliko je sekundarni napon niži od primarnog utoliko je struja sekundara veća od primarne.

1.1.4. Približna konstantnost magnetskog toka, magnetske indukcije, magnetskog napona i gubitaka snage u željezu

U postrojenjima za prenos i raspodjelu električne energije predviđeno je da transformatori rade pod konstantnim (stalnim) naponom i frekvencijom. On se, naravno, mijenja sinusoidalno s vremenom i kad se kaže da je konstantan, misli se na konstantnost njegove efektivne vrijednosti. Ovo se odnosi i na indukovane napone i struje.

Naš zadatak je de proučimo osnovne osobine transformatora na čije smo krajeve primara doveli napon konstantne efektivne vrijednosti (U=const.) i konstantne frekvencije (f=const.).

Ranije smo ustanovili da je protunapon primara po vrijednosti približno jednak naponu koji je doveden na krajeve primara. Pošto je primarni napon konstantan, jasno je da će i protunapon pri stalnoj frekvenciji biti približno konstantne vrijednosti:

$$E_1 \approx U_1 = \text{const.} \qquad \ldots\ldots (1.15)$$

Slično je i sa indukovanim naponom po navoju E, čija je vrijednost približno konstantna

$$E = \frac{E_1}{N_1} \approx \text{const.} \qquad \ldots\ldots (1.16)$$

Kako je, pak, prema formuli (1.4) indukovani napon po navoju pri konstantnoj frekvenciji proporcionalan s magnetskim tokom Φ_m, nije teško izvesti sljedeći zaključak: *kad su primarni napon i frekvencija konstantne vrijednosti, maksimalna vrijednost magnetskog toka ima približno istu vrijednost pri radu transformatora od praznog hoda do nominalnog opterećenja:*

$$\Phi_m = \text{const.} \qquad \ldots\ldots (1.17)$$

Pošto između magnetskog toka i magnetske indukcije postoji odnos $\Phi_m = B_m S_{Fe}$, jasno je da će i maksimalna vrijednost magnetske indukcije B_m ostati približno konstantne vrijednosti pri svim stanjima transformatora od praznog hoda do nominalnog opterećenja

$$B_m \approx \text{const.} \qquad \ldots\ldots (1.18)$$

Kako je maksimalna vrijednost magnetskog toka Φ_m približno konstantne vrijednosti u transformatoru koji radi pod stalnim naponom i stalnom frekvencijom, *mora i maksimalna vrijednost magnetskog napona (magnetopobudne* ili *magnetomotorne sile)* M_m, *potrebnog za održavanje toga toka, biti približno konstantne vrijednosti*

$$M_m \approx \text{const.} \qquad \ldots\ldots (1.19)$$

Vrijednost magnetskog napona u momentu kad je magnetski tok maksimalne vrijednosti data je Kap-Hopkinsonovim zakonom

$$M_m = \frac{\Phi_m}{\Lambda} \qquad \ldots\ldots (1.20)$$

Kao što je poznato, magnetska provodnost nekog kola koje je napravljeno od materijala dobre magnetske provodnosti zavisi od vrijednosti magnetskog toka. Ona se u toku jedne periode mijenja sa magnetskim tokom po vrlo složenom zakonu. Ali za jednu određenu vrijednost magnetskog toka, npr. Φ_m, magnetska provodnost imaće stalno istu vrijednost Λ=const. Iz tog izlazi da će i maksimalna vrijednost magnetskog napona biti nepromjenljiva, odnosno konstantna.

Približna konstantna vrijednost magnetskog toka i magnetske indukcije u željeznom jezgru transformatora priključenog na mrežu konstantnog napona i konstantne frekvencije *potvrđuje činjenicu da su i gubici snage u željezu* P_{Fe} *približno stalni za vrijeme rada transformatora, pri ma kojem opterećenju od praznog hoda do nominalnog opterećenja*

$$P_{Fe} \approx \text{const.} \qquad \ldots\ldots (1.21)$$

Zaista, gubici snage u željezu, ako se radi o određenoj vrsti transformatorskih limova, zavise od kvadrata magnetske indukcije B_m^2 i od frekvencije f. Kako su ove dvije veličine stalne, odnosno ne mijenjaju se u normalnim uslovima rada, nije teško zaključiti da će gubici snage P_{Fe} ostati nepromijenjeni od praznog hoda do nominalnog opterećenja.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta je transformator?
2. Kakva je uloga transformatora pri prenosu električne energije na daljinu?
3. Opišite ekonomski značaj energetskog transformatora pri prenosu električne energije na daljinu!
4. Iz čega se sastoji najjednostavniji transformator?
5. Objasni način rada transformatora!
6. Izvedi prenosni odnos transformatora i utvrdi kakav je odnos između veličine napona i broja navoja namotaja transformatora!
7. Koliko navoja je potrebno na sekundarnom namotaju transformatora za grijanje elektronki radio-prijemnika od 4 V, koji je spojen na električnu mrežu 220 V, ako primarni namotaj ima 1000 navoja?
8. Kakav je odnos između struja i broja navoja namotaja transformatora?
9. Šta je sa strujom pri nepromijenjenoj snazi ako na sekundarnoj strani povećamo broj navoja?
10. Šta je sa naponom na sekundarnoj strani ako u primarnom namotaju povećamo ili smanjimo broj navoja?
11. Objasni približnu stalnost magnetskog toka, magnetske indukcije i magnetskog napona!

1.2. PRAZAN HOD TRANSFORMATORA

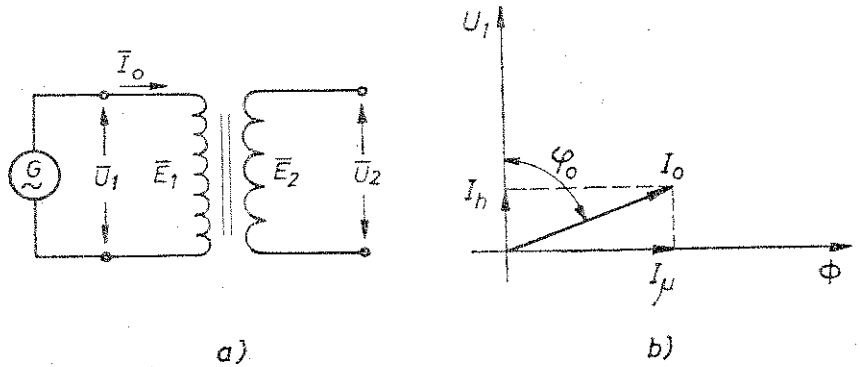
1.2.1. Metode proučavanja rada transformatora

Proučavanje rada transformatora pod opterećenjem, o čemu će biti govora kasnije, podrazumijeva dobro poznavanje dvaju graničnih režima njegova rada: praznog hoda i kratkog spoja.

Izučavanje ova dva granična režima rada transformatora važno je iz dva razloga. Prije svega što možemo razmatrati svaki režim transformatora kao međurežim dva granična slučaja njegova rada i dobiti onaj optimalni režim putem *superpozicije* jednog graničnog režima na drugi. U tome je teorijska vrijednost ovih režima rada. Drugo, što nam prazan hod i kratak spoj transformatora omogućavaju da odredimo veličine koje su veoma važne sa stanovišta eksploatacije transformatora. Na primjer, da bismo odredili stepen korisnog djelovanja transformatora kao jednu od najvažnijih eksploatacionih veličina, moramo ustanoviti gubitke snage praznog hoda i kratkog spoja transformatora. U tome je praktična vrijednost ovih graničnih režima rada transformatora.

1.2.2. Način rada u praznom hodu

Pod praznim hodom transformatora podrazumijevamo takav granični režim rada pri kojem se na njegove primarne krajeve dovodi neki napon, npr. nominalni iz električnog izvora (npr. generatora), a krajevi sekundarnog namotaja su otvoreni (sl. 1.3a).



Sl. 1.3. Jednofazni transformator u praznom hodu

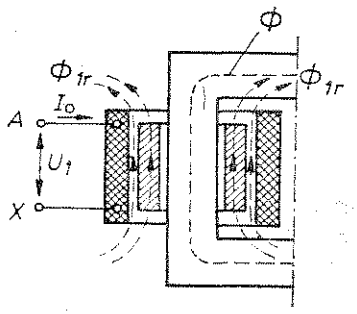
Taj napon koji se sinusoidalno mijenja s vremenom, a određen je efektivnom vrijednošću U_1 i frekvencijom električne mreže f, izaziva u primarnom namotaju struju I_0. Tu struju nazivamo *struja praznog hoda* transformatora (ona se kreće u vrijednosti od 3 do 10% nominalne struje primara).

Glavna komponenta struje praznog hoda koju nazivamo *strujom magnetiziranja* I_μ stvara magnetski napon $M_0 = -I_\mu N_1$, a ovaj magnetski tok Φ, i sa njim je u fazi. Zaostaje iza vektora napona U_1 za 90° i zato je nazivamo *jalovom komponentom* (sl. 1.3b). Manji dio struje praznog hoda troši se na savladavanje gubitaka snage i obilježavamo je sa I_h. To je *aktivna komponenta* i iznosi oko 10% vrijednosti struje praznog hoda, pa je često prilikom proučavanja možemo i zanemariti.

Magnetski napon M_0 stvara magnetski tok koji se svojim najvećim dijelom zatvara kroz željezno jezgro, a budući da prolazi kroz oba namotaja, predstavlja *glavni magnetski tok* transformatora Φ. Drugi znatno manji dio magnetskog toka

zatvara se izvan jezgre i obuhvata samo primarni namotaj. Taj dio toka je *primarni rasipni tok* Φ_{r1}, koji iznosi oko 10% ukupnog magnetskog toka. Na sl. 1.4. prikazana je opisana situacija sa magnetskim tokovima kada je transformator neopterećen.

Glavni magnetski tok Φ stvara u primarnom i sekundarnom namotaju indukovane napone E_1 i E_2. Rasipni tok Φ_{r1} stvara indukovani napon E_{r1}, ali samo u primarnom namotaju. Osim pojave navedenih indukovanih napona, na *aktivnom (omskom) otporu* primarnog namotaja R_1 prilikom proticanja struje I_0 krozanj nastaje protunapon E_{R1}, koji još nazivamo i elektrootpornom silom.

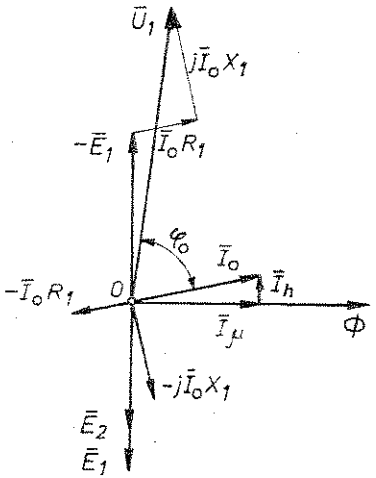


Sl. 1.4. Magnetski tokovi transformatora u praznom hodu

1.2.3. Vektorski dijagram praznog hoda

Prema poznatim zakonitostima elektrotehnike, indukovani naponi zaostaju za pripadajućim magnetskim tokovima za ugao od $\pi/2 = 90°$. Npr. indukovani naponi E_1 i E_2 zaostaju za glavnim magnetskim tokom Φ za 90°. Taj magnetski tok stvara struja magnetiziranja I_μ i sa njom je u fazi. Sve ovo je predstavljeno na slici 1.5. Kako se sa slike vidi, paralelno sa strujom $\bar{I}_0$ na vrh indukovanog napona $-\bar{E}_1$ nanesen je protunapon $-\bar{E}_{R1}$, odnosno pad ili gubitak napona $\bar{U}_{R1}$, koji se troši na savladavanje aktivnog otpora primara. On iznosi:

$$\bar{U}_{R1} = -\bar{E}_{R1} = \bar{I}_0 R_1 \qquad \ldots\ldots (1.22)$$



Sl. 1.5. Vektorski dijagram napona i struja transformatora u praznom hodu

Znak - pokazuje da vektor indukovanog napona $\bar{E}_{R1}$ ima suprotan smjer od vektora struje $\bar{I}_0$ i zato mu je dat naziv protunapon.

Okomito na aktivni pad napona, tj. na njegov vrh nanosimo induktivni pad napona koji iznosi:

$$\bar{E}_{r1} = -j\bar{I}_0 X_1, \qquad \ldots\ldots (1.23)$$

gdje je X_1 *reaktivni (induktivni) otpor* električnog kola primarnog namotaja kada je transformator u praznom hodu. On nastaje isključivo kao posljedica rasipanja magnetskog toka.

1.2.4. **Odnosi napona u praznom hodu**

Primjenivši zakon električne ravnoteže napona (II Kirhofov zakon) na primarni namotaj transformatora, geometrijski zbir indukovanih napona $\bar{E}_1+\bar{E}_{R1}+\bar{E}_{r1}$ mora po vrijednosti biti jednak naponu $\bar{U}_1$, ali suprotan po predznaku, tj.:

$$\bar{U}_1=-(\bar{E}_1+\bar{E}_{R1}+\bar{E}_{r1}) \quad \ldots\ldots (1.24)$$

Aku u ovu formulu uvrstimo navedene dopune (formule 1.22. i 1.23), dobivamo:

$$\bar{U}_1=-\bar{E}_1+\bar{I}_0R_1+j\bar{I}_0X_1 \quad \ldots\ldots (1.25)$$

Koristeći vektorski dijagram (sl. 1.5), nije teško izračunati impedancu (prividni otpor) primarnog namotaja transformatora u praznom hodu pomoću formule

$$Z_1=\sqrt{R_1^2+X_1^2} \quad \ldots\ldots (1.26)$$

Uvrštavanjem izraza za impendancu u formulu (1.25) konačno dobivamo:

$$\bar{U}_1=-\bar{E}_1+\bar{I}_0\bar{Z}_1 \quad \ldots\ldots (1.27)$$

U praznom hodu transformatora zbir napona $\bar{E}_{R1}+\bar{E}_{r1}$, odnosno pad napona $\bar{I}_0\bar{Z}_1$ obično ne prelazi 0,5% vrijednosti napona U_1. Zbog toga napone E_{R1} i E_{r1} možemo zanemariti, pa naponu U_1 dovedenom na primarni namotaj drži ravnotežu praktično samo indukovani protunapon E_1, tj.:

$$\bar{U}_1=-\bar{E}_1 \quad \ldots\ldots (1.28)$$

* * * * * * * * *

1.2.5. **Gubici snage u praznom hodu**

Kada je transformator u praznom hodu, odnosno kada je neopterećen, on ne vrši nikakav koristan rad. Snaga praznog hoda P_0 troši se samo na pokrivanje gubitaka praznog hoda. Gubici u bakru primarnog namotaja su vrlo maleni zbog male vrijednosti struje praznog hoda I_0 i iznose najviše 2% ukupnih gubitaka praznog hoda, pa ih praktično možemo zanemariti. Gubici u željezu nastaju usljed histereze i vrtložnih struja. Osim ovih gubitaka, postoje i dodatni gubici koji iznose od 15 do 20% osnovnih gubitaka u željezu, a nastaju u željeznoj jezgri usljed promjene u sastavu pri mehaničkoj izradi limova jezgre i njihova sastavljanja i izazvani su rasipanjem magnetskih tokova. Pošto osnovni gubici u željezu iznose

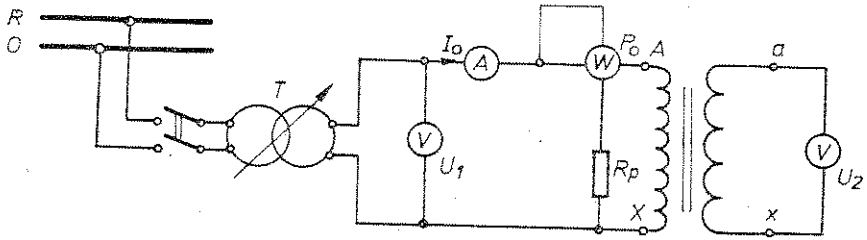
$$P_{Fe}=P_h+P_v, \quad \ldots\ldots (1.29)$$

možemo kazati da su gubici snage u praznom hodu

$$P_0=P_{Fe}+P_d=(1{,}15\div 1{,}20)\,P_{Fe} \quad \ldots\ldots (1.30)$$

1.2.6. **Pokus praznog hoda**

Pokusom ili eksperimentom praznog hoda transformatora prema shemi na sl. 1.6. možemo izmjeriti i izračunati sve relevantne veličine koje su potrebne za snimanje krivulje (karakteristike) praznog hoda na temelju nekoliko vrijednosti dovedenog napona. Ovim pokusom utvrdujemo i gubitke snage neopterećenog transformatora.

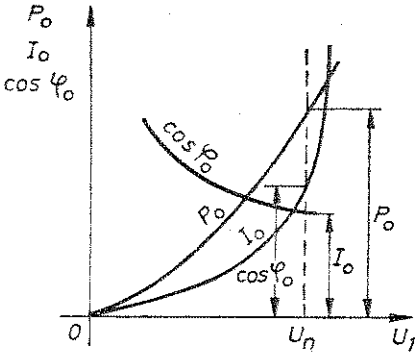


Sl. 1.6. Shema prema kojoj se izvodi pokus praznog hoda transformatora

Pokus izvodimo tako da se na primarni namotaj (strana višeg napona) transformatora koji ispitujemo dovede nominalni napon, a sekundarni namotaj (strana nižeg napona) ostane otvoren (neopterećen). Pri tome, na odgovarajućim instrumentima očitavamo dovedeni napon praznog hoda U_1, struju praznog hoda I_0 i snagu u praznom hodu P_0 koju ispitivani transformator uzima iz električne mreže. Faktor snage $\cos\varphi$ odredujemo računskim putem.

Mjerenje vršimo nekoliko puta da bismo dobili vrijednost podataka potrebnih za konstruisanje dijagrama. Preporučuje se da se mjerenja vrše u granicama dovedenog napona od 0,5 do 1,1 U_n, a najmanje četiri puta: $U_1=0{,}5U_n$; $U_1=0{,}9U_n$; $U_1=U_n$ i $U_1=1{,}1\ U_n$. Struja I_0 i snaga P_0 treba da budu na dijagramu prikazane u funkciji dovedenog napona U_1 (sl. 1.7). Prema dijagramu na sl. 1.7, za vrijednost primarnog napona $U_1=U_n$ očitavamo:

— struju praznog hoda I_0, koju izražavamo u postocima nominalne struje (npr. $I_0=10\%\ I_n$ ili $0{,}1\ I_n$);



Sl. 1.7. Dijagram transformatora pri pokusu praznog hoda

— snagu koju transformator uzima iz mreže P_0, koja predstavlja gubitke u željezu:

$$P_0 = P_{Fe} \qquad \ldots\ldots (1.31)$$

Veličina dobivenih gubitaka u željezu će biti približno konstantna i jednaka i za nominalno opterećenje transformatora, što predstavlja praktičan značaj pokusa praznog hoda transformatora;

— vrijednost faktora snage za koji se vidi da opada i za nominalni napon iznosi oko 0,1. Dakle, u praznom hodu transformator predstavlja induktivni teret (loš faktor snage).

Kako smo već ranije kazali, u praznom hodu transformatora $U_1 \approx E_1$ i $U_2 = E_2$, pa se ovim pokusom može izračunati i odnos transformacije

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} \qquad \ldots\ldots (1.32)$$

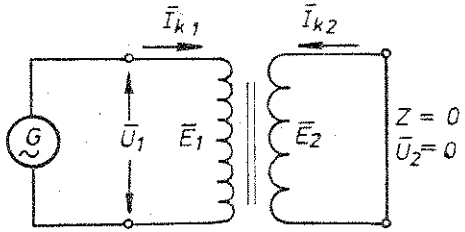
PITANJA ZA PROVJERU

1. Koja su dva granična režima rada transformatora i kakav je značaj njihovog izučavanja?
2. Kada se transformator nalazi u praznom hodu?
3. Objasni način rada transformatora u praznom hodu!
4. Nacrtaj vektorski dijagram transformatora u praznom hodu!
5. Koji gubici nastaju u transformatoru pri praznom hodu i kolike su njihove vrijednosti?
6. Do kojih veličina dolazimo pri pokusu praznog hoda transformatora?

1.3. KRATAK SPOJ TRANSFORMATORA

1.3.1. Način rada u kratkom spoju

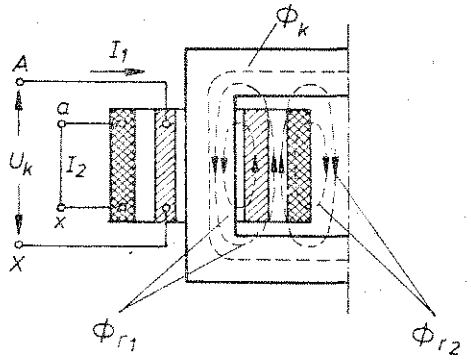
Pod kratkim spojem transformatora podrazumijevamo takav granični režim rada pri kojem je primarni namotaj priključen na nominalni napon, a sekundarni su mu krajevi kratko spojeni (impedanca trošila jednaka je nuli), kako je to shematski prikazano na sl. 1.8.



Sl. 1.8. Jednofazni transformator u kratkom spoju

Razlikujemo udarni kratki spoj transformatora, koji nastaje u uslovima rada, odnosno eksploatacije, i kratki spoj transformatora, koji nastaje u procesu ispitivanja. Ovaj prvi, eksploatacioni kratki spoj transformatora, koji nastaje mimo naše volje, vrlo je opasan po transformator, jer njegovim namotajima teku i do 20 puta veće struje od nominalnih. Te vrlo velike struje svojim toplotnim djelovanjem izazvale bi znatno povećanje temperature namotaja (do 250° C) i vrlo brzo dovele do njihovog uništenja. Pored toga, vrlo velike struje uzrokuju i pojave opasnih mehaničkih naprezanja, kako između pojedinih dijelova namotaja tako i između samih namotaja. Pošto kratki spoj transformatora može nastati u svako vrijeme, i to vrlo često nepredviđeno, potrebno je da transformatore u pogonu osiguramo uređajima koji bi ih pri pojavi kratkog spoja isključivali iz pogona.

Velike struje kratkog spoja u primarnom i sekundarnom namotaju stvaraju i velike magnetske napone $M_1 = I_1 N_1$ i $M_2 = I_2 N_2$, koji u jezgri transformatora stvaraju magnetske tokove velike magnetske indukcije. Pošto struje I_1 i I_2 po Lencovom zakonu svojim magnetskim djelovanjem (magnetskim naponima) djeluju međusobno suprotno, glavni magnetski tok Φ_k u jezgri transformatora biće veoma mali, dok će rasipni magnetski tokovi oba namotaja Φ_{r1} i Φ_{r2} biti veliki, kako je to predstavljeno na sl. 1.9. Dok oba magnetna napona (primarni i sekundarni) djeluju u jezgri transformatora međusobno suprotno, dotle njihovo djelovanje između namotaja (zračni zazor) ima jedan smjer, sabira se, tj. $M_r = M_{r1} + M_{r2}$.



Sl. 1.9. Magnetski tokovi transformatora u kratkom spoju

1.3.2. Napon kratkog spoja

Kratki spoj koji izazivamo namjerno primjenjujemo kada želimo transformator ispitati, odnosno dobiti relevantne podatke. Da ne bi došlo do oštećenja transformatora, moramo na neki način izvršiti ograničenje struja kratkog spoja. To činimo na taj način što na krajeve primarnog namotaja dovodimo znatno manji napon, odnosno dovodimo napon tolike vrijednosti da struje u namotajima ne budu veće od nominalnih struja transformatora. Taj napon nazivamo naponom kratkog spoja U_k. Ukoliko ga izrazimo dijelom (ili postocima) nominalnog napona odgovarajućeg namotaja, dobivamo takozvani (relativni) napon kratkog spoja, tj.

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} 100\ (\%) \qquad \ldots\ldots (1.33)$$

Ovaj napon izražen u postocima je veoma značajna veličina i upisana je na pločici transformatora. Napon kratkog spoja kreće se od 2,5 do 5% za transformatore male i srednje snage, dok za transformatore velikih snaga njegova vrijednost se kreće od 10 do 15%.

Na osnovu izmjerenog napona kratkog spoja lako dolazimo do vrijednosti struje kratkog spoja I_k (struja eksploatacije) iz već poznatog odnosa

$$\frac{U_n}{U_k}=\frac{I_k}{I_n} \qquad \ldots\ldots (1.34)$$

Uvrštavanjem formule 1.34. u formulu 1.35. dobivamo

$$I_k=I_n\frac{100}{u_k} \qquad \ldots\ldots (1.35)$$

1.3.3. **Gubici snage u kratkom spoju**

Kako smo već ranije ustanovili, pri kratkom spoju u jezgri transformatora magnetski tok je malen, odnosno malena je i njegova magnetska indukcija. Isto tako, ranije smo ustanovili da su gubici u željezu P_{Fe} proporcionalni sa kvadratom magnetske indukcije, tj.

$$P_{Fe}\sim B_m^2 \qquad \ldots\ldots (1.36)$$

Pošto je u kratkom spoju dovedeni napon i do dvadesetak puta manji od nominalnog to će za toliko puta biti manja magnetska indukcija u jezgri, a prema tome i manji gubici u željezu. Ako znamo da su ti gubici u praznom hodu oko 2% nominalne snage transformatora, onda nije teško zaključiti da su pri kratkom spoju toliko mali da ih ne uzimamo u obzir. Dakle, gubici u kratkom spoju transformatora su samo gubici u bakru. To je zbir gubitaka u primarnom i sekundarnom namotaju.

Ako prilikom ispitivanja transformatora u kratkom spoju za ispitnu struju odaberemo nominalnu struju transformatora, dobićemo nominalnu snagu kratkog spoja P_{kn}, tj.

$$P_{kn}=I_{n1}^2R_1+I_{n2}^2R_2 \qquad \ldots\ldots (1.37)$$

To je veoma važna eksploataciona veličina transformatora, a ponekad je iz praktičnih razloga potrebno da je izražena u postocima:

$$p_{kn}=\frac{P_{kn}}{P_n}100\,(\%), \qquad \ldots\ldots (1.38)$$

gdje je p_{kn} iznos gubitaka snage kratkog spoja u postocima pri $I_{kn}=I_n$. Vrijednost njegova iznosa ide i do 4%.

Gubici snage u bakru pri nominalnom opterećenju transformatora jednaki su nominalnoj snazi kratkog spoja pri $I_k=I_n$, pa možemo pisati:

$$P_{Cun}=P_{kn} \qquad \ldots\ldots (1.39)$$

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

1.3.4. **Odnosi napona i struja u kratkom spoju**

Onako kako smo to uradili prilikom određivanja napona primarnog namotaja transformatora u praznom hodu, primjenivši zakon električne ravnoteže napona (II Kirhofov zakon), geometrijski zbir napona $\bar{E}_1+\bar{E}_{R1}+\bar{E}_{r1}$ u svakom trenutku

mora po vrijednosti biti jednak dovedenom naponu na transformator U_k, ali suprotnog smjera:

$$\bar{U}_k=-(\bar{E}_1+\bar{E}_{R1}+\bar{E}_{r1}) \qquad \ldots\ldots (1.40)$$

Uvrštavanjem u ovu jednačinu vrijednosti za napone $\bar{E}_{R1}=-\bar{I}_1\bar{R}_1$ i $\bar{E}_{r1}=-j\bar{I}_1\bar{X}_1$, dobivamo:

$$\bar{U}_k=-\bar{E}_1+\bar{I}_1\bar{R}_1+j\bar{I}_1\bar{X}_1$$

$$\bar{U}_k=-\bar{E}_1+\bar{I}_1(R_1+jX_1).$$

Koristeći se poznatim izrazom za impedancu $\bar{Z}_1=R_1+jX_1$ i uvrštavanjem u prethodnu jednačinu, dobivamo:

$$\bar{U}_k=-\bar{E}_1+\bar{I}_1\bar{Z}_1 \qquad \ldots\ldots (1.41)$$

Pošto je sekundarni namotaj kratko spojen, njegov napon biće ravan nuli ($U_2=0$), pa se naponi koji djeluju u namotaju moraju nalaziti međusobno u ravnoteži, tj.

$$0=\bar{E}_2-\bar{E}_{R2}+\bar{E}_{r2}=\bar{E}_2-\bar{I}_2R_2-j\bar{I}_2X_2$$

$$0=\bar{E}_2-\bar{I}_2\bar{Z}_2,$$

gdje je $\bar{Z}_2=R_2+jX_2$ impedanca sekundarnog namotaja.

Konačno, jednačinu dobivamo u ovom obliku:

$$\bar{E}_2=\bar{I}_2\bar{Z}_2=\bar{I}_2(R_2+jX_2) \qquad \ldots\ldots (1.42)$$

Iz formule vidimo da se napon $\bar{E}_2$ sastoji od dvije komponente. Komponenta $\bar{I}_2R_2$ savladava aktivni otpor sekundarnog namotaja R_2, a komponenta $j\bar{I}_2X_2$ njegov induktivni otpor X_2. Prvu nazivamo aktivnim, a drugu induktivnim padom napona u sekundarnom namotaju.

Pored odnosa između napona, potrebno je još utvrditi i odnose između struja primarnog i sekundarnog namotaja I_1 i I_2. Struja I_1 stvara magnetski napon u primaru $M_1=I_1N_1$, a struja I_2 magnetski napon $M_2=I_2N_2$ u sekundaru. Magnetski napon M_1 stvara glavni magnetski tok Φ_k. Pošto napon U_k iznosi samo nekoliko postotaka nominalnog napona transformatora U_n, razumljivo je da će u skladu s tim doći do smanjenja napona E_1 i, naravno, magnetskog toka Φ_m. Da zaključimo: pri kratkom spoju transformatora magnetski naponi M_1 i M_2 su po vrijednosti jednaki, ali im je djelovanje suprotno (uzajamna ravnoteža). Dakle,

$$\bar{M}_1=-\bar{M}_2, \text{ odnosno } \bar{M}_1+\bar{M}_2=0 \qquad \ldots\ldots (1.43)$$

Uvrštavanjem u gornju formulu vrijednosti za M_1 i M_2 dobivamo:

$$\bar{I}_1N_1=-\bar{I}_2N_2, \text{ odnosno } \bar{I}_1N_1+\bar{I}_2N_2=0 \qquad \ldots\ldots (1.44)$$

Uzimajući u obzir samo apsolutne vrijednosti struja I_1 i I_2, dobivamo:

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{k} \qquad \ldots\ldots (1.45)$$

Kako se iz formule vidi, pri kratkom spoju transformatora odnos između struja određen je isto kao i odnos između napona u praznom hodu (1.33), tj. odnosom transformacije.

1.3.5. **Reduciranje (svođenje) električnih veličina sa sekundara na primar**

Pošto namotaji primara i sekundara imaju različit broj navoja ($N_1 \neq N_2$), to će i ostale električne veličine kao što su naponi, struje, otpori itd. biti međusobno po vrijednosti različite. To otežava analitičko, a posebno grafičko predstavljanje tih veličina.

Da bismo izbjegli sve te teškoće, poslužićemo se metodom prema kojoj oba namotaja transformatora svodimo (reduciramo) na isti broj navoja. Obično svodimo sekundarni namotaj na primarni, uz uslov da se ova operacija redukcije ne odražava na režim rada primarnog električnog kola. Sve veličine koje se odnose na svođeni sekundarni namotaj nazivaju se reduciranim veličinama i označavaju se istim slovima kao i stvarne veličine, ali sa crticom, npr. E_2', I_2', R_2' itd.

Da bismo dobili svedeni sekundarni indukovani napon E_2', potrebno je promijeniti napon E_2 u skladu s odnosom broja navoja primarnog i sekundarnog namotaja N_1 i N_2, tj. proporcionalno odnosu transformacije $k=N_1/N_2$. Iz toga izlazi:

$$E_2'=\frac{N_1}{N_2}E_2=kE_2=E_1 \qquad \ldots\ldots (1.46)$$

Pri reduciranju sekundarnog namotaja na primarni, njegova prividna snaga mora ostati ista, tj. $E_2'I_2'=E_2I_2$. Iz ovog izlazi:

$$I_2'=\frac{E_2}{E_2'}I_2=\frac{1}{k}I_2 \qquad \ldots\ldots (1.47)$$

Znači, da bismo dobili I_2', moramo promijeniti struju I_2 obrnuto proporcionalno odnosu transformacije.

Pri reduciranju aktivnog otpora sekundarnog namotaja R_2, koristimo se ranijom tvrdnjom da se pri svođenju sekundarnog namotaja na primarni snaga ne mijenja, tj. gubici snage u bakru stvarnog i svođenog namotaja ostaju jednaki. $I_2^{2\prime}R_2'=I_2'R_2$. Odavde je:

$$R_2'=\left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2R_2=k^2R_2 \qquad \ldots\ldots (1.48)$$

Da bismo dobili R_2', što se vidi iz formule, moramo promijeniti otpor R_2, srazmjerno kvadratu odnosa transformacije.

Da bi se zadržale iste vrijednosti prividne, odnosno reaktivne snage, tj. da bi faktor snage ostao nepromijenjen, potrebno je da se svi otpori reduciraju na isti način, tj.:

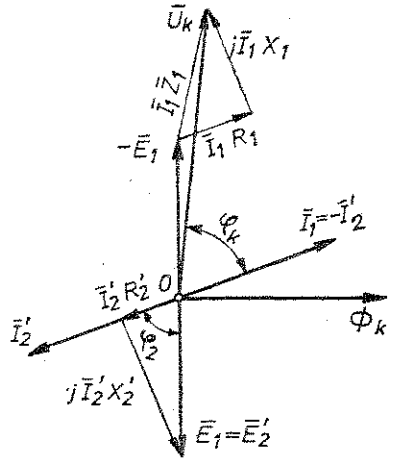
$$X_2'=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2X_2=k^2X_2 \qquad \ldots\ldots (1.49)$$

$$Z_2'=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2Z_2=k^2Z_2 \qquad \ldots\ldots (1.50)$$

gdje je X_2' — reducirani induktivni otpor (reaktanca) sekundara, a Z_2' — reducirani prividni otpor (impedanca) sekundara. Da bismo dobili X_2' i Z_2', iz formula 1.49. i 1.50. vidimo da moramo promijeniti X_2 i Z_2, tj. srazmjerno kvadratu odnosa transformacije.

1.3.6. **Vektorski dijagram reduciranog transformatora u kratkom spoju**

Pri konstruisanju vektorskog dijagrama reduciranog transformatora u kratkom spoju, vektor glavnog magnetskog toka Φ_k usmjeren je u pozitivnom smjeru apscisne ose, kako je to predstavljeno na sl. 1.10. Kako je već poznato, magnetski tok Φ_k indukuje u namotajima primara i sekundara napone E_1 i E_2. Pošto je kod reduciranog transformatora $E_2'=E_1$, formula 1.46, oba ova indukovana napona predstavljena su istim vektorom koji zaostaje za magnetskim tokom za $\pi/2=90°$. Indukovani napon kratko spojenog sekundara E_2' tjera struju I_2' koja za njim zaostaje za ugao φ_2. Primjenjujući već ranije poznatu jednačinu napona sekundara $\overline{E}_2'=\overline{I}_2'\overline{Z}_2'=\overline{I}_2'(R_2'+jX_2')$, aktivni pad napona predstavljen je vektorom $\overline{I}_2'R_2'$ i sa strujom $\overline{I}_2'$ je u fazi, a induktivni pad napona vektorom $j\overline{I}_2'X_2'$ koji prednjači vektoru struje I_2' za ugao $\pi/2$. Tako dobivamo pravougli trougao napona i padova napona sekundarnog namotaja.



Sl. 1.10. Vektorski dijagram transformatora u kratkom spoju

S obzirom da je glavni magnetski tok Φ_k mali, struja I_0 također je mala, pa je možemo zanemariti. Primjenjujući jednačinu magnetskih napona 1.44, uzimamo da su primarne i sekundarne struje po pravcu jednake, ali su suprotnog smjera. Kod reduciranog transformatora, bez obzira na broj navoja primara i sekundara, vrijednosti struja su jednake. Dakle,

$$\overline{I}_1N_1=-\overline{I}_2N_2=-\overline{I}_2'N_1,$$

odakle je:

$$\overline{I}_1=-\overline{I}_2' \qquad \ldots\ldots (1.51)$$

Jednačinom $\overline{U}_k=-\overline{E}_1+\overline{I}_1\overline{Z}_1$ dobivamo vektor napona U_k koji smo doveli na krajeve primarnog namotaja transformatora. Ugao φ_k pokazuje fazni pomak struje $\overline{I}_1$ prema naponu $\overline{U}_k$. Na dijagramu vektor $-\overline{E}_1$ crtamo u protufazi s vektorom E_1. Na njegov vrh nanosimo vektor aktivnog pada napona $\overline{I}_1R_1$ (paralelno sa strujom I_1), a opet na njegov vrh okomito nanosimo vektor induktivnog pada napona $j\overline{I}_1X_1$.

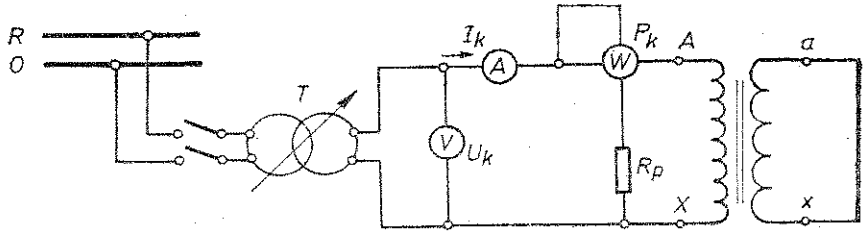
* * * * * * * * *

1.3.7. **Pokus kratkog spoja**

Pokusom kratkog spoja transformatora prema shemi 1.11. utvrđujemo gubitke snage koji nastaju prolaskom struje kroz namotaje. Zbog relativno niskog dovedenog napona U_k, gubici u željezu koji pri tome nastaju su maleni pa ih praktično mo-

žemo zanemariti. Znači, snaga koju očitavamo na vatmetru predstavlja isključivo gubitke u bakru, tj. $P_k = P_{Cu}$.

Pokus izvodimo tako da se na krajeve primarnog namotaja transformatora koji ispitujemo dovodi toliki napon sve dok kroz njega ne poteče nominalna struja I_n. Pri tome su krajevi sekundarnog namotaja kratko spojeni. Na odgovarajućim



Sl. 1.11. Shema prema kojoj se izvodi pokus kratkog spoja transformatora

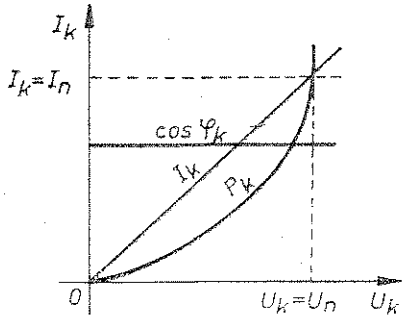
instrumentima očitavamo dovedeni napon kratkog spoja U_k, struju kratkog spoja I_k i snagu gubitaka P_k. Faktor snage kratkog spoja određujemo računskim putem na osnovu izmjerenih električnih veličina po formuli:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{U_k I_k} \text{ (broj)} \qquad \ldots\ldots (1.52)$$

Mjerenje vršimo nekoliko puta da bismo dobili vrijednost podataka potrebnih za konstruisanje dijagrama. Preporučuje se da se mjerenja vrše u granicama struje kratkog spoja od 0,5 do 1,1 I_n, a najmanje četiri puta: $I_k = 0{,}5\, I_n$; $I_k = 0{,}9\, I_n$; $I_k = I_n$ i $I_k = 0{,}5\, I_n$. Treba zapamtiti da pokus kratkog spoja u praksi izvodimo tako što u prvom slučaju na krajeve primara dovedemo toliki napon kratkog spoja U_k da namotajima poteče najveća ispitivana struja kratkog spoja $I_k = 1{,}1\, I_n$ itd. (obrnutim redom od pokusa praznog hoda).

Da bismo izbjegli dodatno zagrijavanje namotaja, pokus treba izvesti u što kraćem vremenu.

Za razne izmjerene vrijednosti struje kratkog spoja I_k na voltmetru očitavamo odgovarajući dovedeni napon kratkog spoja U_k.



Sl. 1.12. Dijagram transformatora pri pokusu kratkog spoja

Na temelju ovih vrijednosti konstruišemo karakteristike kratkog spoja čiji je načelni tok prikazan na sl. 1.12. Za struju kratkog spoja $I_k = I_n$ na osnovu karakteristike određujemo:

— napon kratkog spoja U_k i na osnovu njega izračunamo njegovu procentualnu vrijednost:

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} 100 \ (\%);$$

— snagu kratkog spoja koja predstavlja gubitke u bakru transformatora

$$P_k = P_{Cun}$$

Veličina ovih gubitaka će biti ista i za nominalno opterećenje transformatora, što predstavlja praktičan značaj pokusu kratkog spoja;

— faktor snage $\cos \varphi_k$ koji je u kratkom spoju konstantna veličina.

Pored toga, na temelju dobivenih vrijednosti možemo izračunati parametre:

— impedancu transformatora u kratkom spoju: $Z = \frac{U_k}{I_n}$,

— aktivni otpor transformatora u kratkom spoju: $R_k = \frac{R_{kn}}{I_n^2}$,

— induktivni otpor transformatora u kratkom spoju:

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{\left(\frac{U_k}{I_n}\right)^2 - \left(\frac{P_{kn}}{I_n^2}\right)^2}.$$

Ovi parametri su osnova za Kapov trougao i izračunavanje pada napona Kapovim dijagramom, što također predstavlja praktičan značaj pokusa kratkog spoja transformatora.

PITANJA ZA PROVJERU

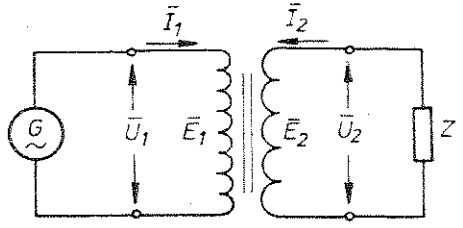
1. Šta je kratki spoj i kada se transformator može naći u kratkom spoju?
2. Objasni način rada transformatora u kratkom spoju!
3. Šta nazivamo naponom kratkog spoja transformatora i kakav značaj ima relativni napon kratkog spoja?
4. Koji gubici nastaju u transformatoru pri kratkom spoju i kolike su njihove vrijednosti?
5. Šta znači svesti (reducirati) električne veličine sa sekundara na primar?
6. Nacrtaj vektorski dijagram transformatora u kratkom spoju!
7. Zašto je u kratkom spoju vrijednost magnetskog toka vrlo mala?
8. Do kojih veličina dolazimo pri pokusu kratkog spoja transformatora?

1.4. TRANSFORMATOR OPTEREĆEN

Rad transformatora pod opterećenjem (pogonsko stanje) podrazumijeva stanje između dva krajnja režima rada (praznog hoda i kratkog spoja). Znači, opterećen transformator podvrgnut je istim zakonitostima koji vrijede za ova dva krajnja režima rada, o kojima je do sada bilo dosta govora. Transformator sa opterećenjem blizu režima rada praznog hoda pogonski bi bio neiskorišten. Kada bi se njegovo opterećenje približilo krajnjem pogonskom stanju (kratki spoj) transformator bi bio izložen opasnosti prevelikog zagrijavanja i uništenja. Iz navedenog zaključujemo da na sekundarni namotaj možemo dovesti toliki teret čije veličine ne prelaze njegove nominalne vrijednosti.

1.4.1. **Način rada opterećenog transformatora**

U praznom hodu, kako smo već ustanovili, struja magnetiziranja I_μ (jalova komponenta struje praznog hoda I_0) stvara u jezgri transformatora glavni magnetski tok Φ. On obuhvata oba namotaja i u njima indukuje napone E_1 i E_2. Napon E_1 sa padovima napona drži ravnotežu dovedenom naponu U_1, čija veličina ima uvijek stalnu vrijednost. Priključenjem tereta na sekundarni namotaj, kroz njegovo zatvoreno električno kolo napon E_2 tjera struju I_2, čija će vrijednost kao i njen fazni pomak biti određeni prividnim otporom (impedancom) električnog kola i veličinom njegovih komponenata. Na slici 1.13. predstavljena je shema opterećenog transformatora.



Sl. 1.13. Jednofazni transformator opterećen

Prolazeći kroz sekundarni namotaj, struja I_2 stvara stalni magnetski napon $M_2=I_2N_2$ koji svojim dejstvom utiče na slabljenje magnetskog napona primara $M_1=I_0N_1$ stvorenog od struje praznog hoda I_0. Glavni magnetski tok Φ na ovaj način bio bi oslabljen, a prema tome i veličina napona što ga je on indukovao bila bi smanjena. U ovom slučaju smanjeni napon E_1 ne bi mogao držati ravnotežu dovedenom naponu U_1, pa bi primarni namotaj morao iz električne mreže da vuče povećanu struju tolike vrijednosti da bi se kompenziralo djelovanje struje sekundarnog namotaja. Povećanje struje primara pri opterećenju sekundara objašnjavamo vrlo jednostavno. Pri praznom hodu transformatora snaga se troši samo na savladavanje gubitaka u željezu P_{Fe}, dok se pri opterećenju moraju savladati i gubici u bakru i snaga tereta.

Opterećenje kao i njegova promjena, kako smo već konstatovali, utiču i na promjenu indukovanog napona E_1 i glavnog magnetskog toka Φ. Pri većem opterećenju ove dvije veličine se smanjuju (ekstremno u kratkom spoju su vrlo male). Međutim, područje između režima rada praznog hoda i nominalne snage transformatora predstavlja vrlo mali dio raspona od praznog hoda do kratkog spoja. Zato su promjene indukovanog napona i magnetskog toka u tom području male (zanemarujemo ih), pa uzimamo da su i indukovani napon i glavni magnetski tok stalni, tj. $E_1=\text{const.}$, $\Phi=\text{const.}$

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

1.4.2. **Odnosi napona i struja opterećenog transformatora**

Kada transformator radi pod opterećenjem u primarnom namotaju, osim dovedenog napona U_1 djeluju i indukovani naponi E_1, E_{R1} i E_{r1}. Međutim, napon E_{R1} nema karakter indukovanog napona i njegova je priroda

drukčija. Kao i ranije, primjenjujući zakon električne ravnoteže napona, dolazimo do međusobne ovisnosti tih napona

$$\bar{U}_1=-(\bar{E}_1+\bar{E}_{R1}+\bar{E}_{r1}) \qquad \ldots\ldots (1.53)$$

Uvrštavanjem u gornju jednačinu vrijednosti za $\bar{E}_{R1}=-\bar{I}_1R_1$ i $\bar{E}_{r1}=-j\bar{I}_1X_1$, dobivamo:

$$\bar{U}_1=-\bar{E}_1+\bar{I}_1(R_1+jX_1)=-\bar{E}_1+\bar{I}_1\bar{Z}_1 \qquad \ldots\ldots (1.54)$$

U sekundarnom namotaju djeluju isti naponi kao kod kratko spojenog transformatora. Sa stvarnih veličina preći ćemo na inducirane. To su $\bar{E}_2'$, $\bar{E}_{R2}'$ i $\bar{E}_{r2}'$. Međutim, razlika je u tome što su pri kratkom spoju oni uravnoteženi međusobno, a pri opterećenju oni drže ravnotežu naponu $\bar{U}_2'$ koji vlada na krajevima sekundarnog namotaja, pa imamo:

$$\bar{E}_2'+\bar{E}_{R2}'+\bar{E}_{r2}'=\bar{U}_2' \qquad \ldots\ldots (1.55)$$

Uvrštavanjem u gornju jednačinu vrijednosti za napone $\bar{E}_{R2}'=-\bar{I}_2'R_2'$ i $\bar{E}_{r2}'=-j\bar{I}_2'\bar{X}_2'$ dobivamo:

$$\bar{E}_2'-\bar{I}_2'(R_2'+jX_2')=\bar{E}_2'-\bar{I}_2'\bar{Z}_2'=\bar{U}_2' \qquad \ldots\ldots (1.56)$$

Prebacivanjem komponente $-\bar{I}_2'\bar{Z}_2'$ na desnu stranu jednačine dobivamo:

$$\bar{E}_2'=\bar{U}_2'+\bar{I}_2'\bar{Z}_2' \qquad \ldots\ldots (1.57)$$

Kod opterećenog transformatora magnetizirajuću komponentu M_0 magnetskog napona M_1 primarnog namotaja (neophodna za stvaranje glavnog magnetskog toka) ne smijemo zanemariti, kao što smo to činili u kratkom spoju, jer u normalnim uslovima rada njena vrijednost se kreće od 3 do 10% M_1. Na taj način je:

$$\bar{M}_1=-\bar{M}_2+\bar{M}_1, \text{ odnosno } \bar{M}_1+\bar{M}_2=\bar{M}_0 \qquad \ldots\ldots (1.58)$$

Uvrštavanjem u gornju jednačinu vrijednosti za magnetske napone $\bar{M}_1=\bar{I}_1N_1$, $\bar{M}_2=\bar{I}_2N_2$ i $\bar{M}_0=\bar{I}_0N_1$ dobivamo:

$$\bar{I}_1N_1=-\bar{I}_2N_2+\bar{I}_0N_1, \text{ odnosno } \bar{I}_1N_1+\bar{I}_2N_2=\bar{I}_0N_1 \qquad \ldots\ldots (1.59)$$

Podijelimo jednačinu 1.59. sa N_1, pa imamo:

$\bar{I}_1+\bar{I}_2\dfrac{N_2}{N_1}=\bar{I}_0$, a kako je $\bar{I}_2\dfrac{N_2}{N_1}=\dfrac{\bar{I}_2}{k}$, u stvari, struja sekundara reducirana na primarnu stranu, možemo pisati:

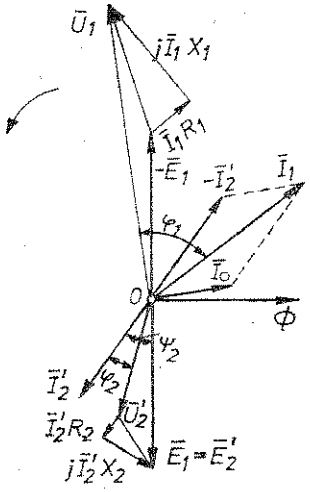
$$\bar{I}_1=\bar{I}_0-\bar{I}_2', \text{ odnosno } \bar{I}_2+\bar{I}_2'=\bar{I}_0 \qquad \ldots\ldots (1.60)$$

* * * * * * * * *

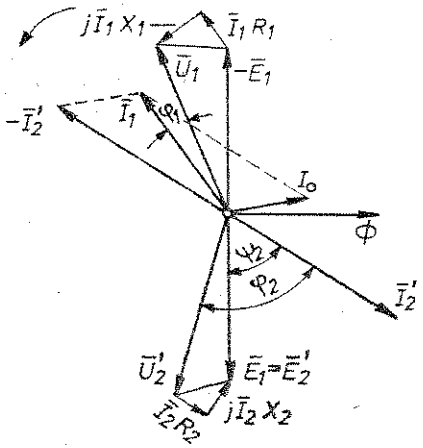
1.4.3. **Vektorski dijagram opterećenog transformatora**

Iz opisanog načina rada opterećenog transformatora ustanovili smo da su glavni magnetski tok Φ i struja praznog hoda I_0 (1.60) stalne vrijednosti. Također smo ustanovili analitički u obliku jednačina napone i magnetske napone čije odnose možemo predstaviti pomoću vektorskog dijagrama.

Uzmimo transformator čiji su krajevi primarnog namotaja spojeni na električnu mrežu stalnog napona i stalne frekvencije, a da je na sekundarni namotaj priključen teret (trošilo sa radno induktivnim otporom) tako da struja I_2 zaostaje iza napona E_2' za ugao ψ_2. Kao i kod konstruisanja vektorskog dijagrama kratkog spoja, vektor glavnog magnetskog toka Φ postavljamo u pozitivni smjer apscisne osi (sl. 1.14). Naponi E_1 i E_2' stvoreni tim magnetskim tokom zaostaju za njim za ugao od 90°. Da bismo nacrtali vektor napona sekundarnog namotaja U_2', potrebno je, koristeći formulu 1.55, indukovani napon sekundarnog namotaja E_2' geometrijski sabrati sa naponima E_{r2}' i E_{R2}'. To činimo na taj način što na vrh vektora napona E_2' nanosimo vektor $\bar{E}_{r2}' = -j\bar{I}_2' X_2'$ (induktivni pad napona) koji zaostaje iza struje I_2' za ugao od 90°. Na vrh prethodnog vektora E_{r2}' nanosimo vektor $\bar{E}_{R2}' = -\bar{I}_2' R_2'$ (aktivni pad napona) koji je paralelan sa vektorom struje $\bar{I}_2$, ali je suprotnog smjera



Sl. 1.14. Vektorski dijagram transformatora pri aktivno—induktivnom opterećenju



Sl. 1.15. Vektorski dijagram transformatora pri kapacitivnom opterećenju

(u protufazi). Spajanjem tačke 0 početka koordinatnog sistema sa vrhom vektora $\bar{I}_2' R_2'$ dobivamo rezultirajući napon koji predstavlja napon sekundarnog namotaja $\bar{U}_2'$. On prednjači struji $\bar{I}_2'$ za ugao φ_2.

Da bismo konstruisali vektor struje primarnog namotaja I_1, koristićemo već poznati vektorski dijagram praznog hoda sl. 1.5.

Nacrtamo vektor struje praznog hoda $\bar{I}_0$, koja prednjači vektoru glavnog magnetskog toka Φ za vrlo mali ugao i vektor struje $-\bar{I}_2'$, koja je u protufazi s vektorom

$\bar{I}_2$. Vektor struje primara $\bar{I}_1$ dobiven pomoću paralelograma predstavlja rezultantu vektora $\bar{I}_0$ i $-\bar{I}_2'$.

Primarni napon U_1 konstruišemo uz primjenu već poznatog dijagrama kratkog spoja sl. 1.10, pomoću vektora napona $-\bar{E}_1$ koji je uravnotežen s naponom E_1 te aktivnog i induktivnog pada napona. To činimo tako što na vrh vektora napona $-\bar{E}_1$ nanosimo vektor aktivnog pada napona $\bar{E}_{R1} = -\bar{I}_1 R_1$ (paralelno sa strujom I_1), a opet na njegov vrh nanosimo okomito vektor induktivnog pada napona $\bar{E}_{r1} = -j\bar{I}_1 X_1$. Spajanjem tačke 0 početka koordinatnog sistema sa vrhom vektora $\bar{I}_1 X_1$ dobivamo rezultirajući napon koji predstavlja napon primarnog namotaja U_1. On prethodi struji I_1 za ugao φ_1.

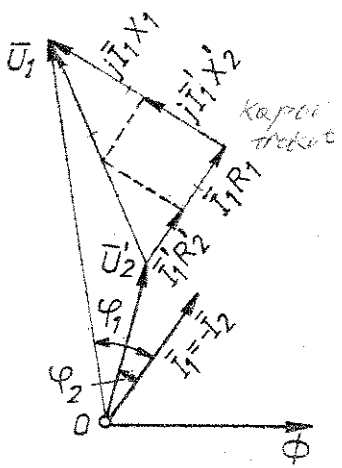
Sl. 1.15. predstavlja vektorski dijagram transformatora čiji je sekundar kapacitivno opterećen.

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

1.4.4. **Kapov dijagram**

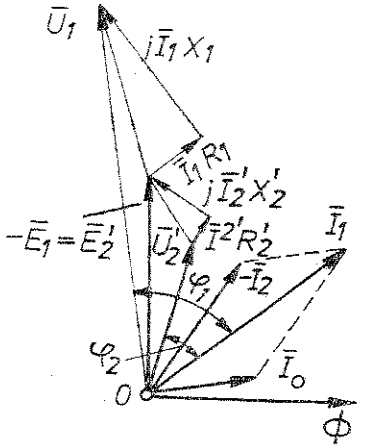
Vektorski dijagrami sl. 1.14. i 1.15. prikazuju i objašnjavaju fizičku suštinu rada opterećenog transformatora. Međutim, nisu praktični za proračune, pa ih je potrebno pojednostaviti.

Prvo pojednostavljenje vršimo tako što sve veličine sekundarnog namotaja svodimo na primarni namotaj i zakrećući sekundarnu stranu dijagrama za 180° dobivamo svedeni vektorski dijagram opterećenog transformatora (sl. 1.16).



Sl. 1.16. Svedeni vektorski dijagram opterećenog transformatora

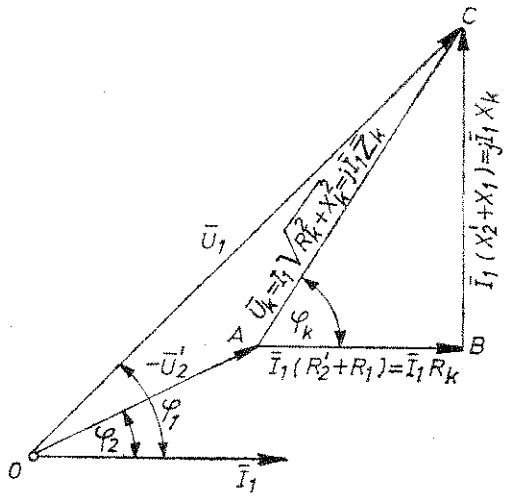
zamjena



Sl. 1.17. Opšti svedeni vektorski dijagram opterećenog transformatora sa Kapovim pretpostavkama

Drugo pojednostavljenje sastoji se u tome da zanemarujemo struju magnetiziranja I_0. To možemo učiniti, jer njena srednja vrijednost ne prelazi 5% nominalne struje. Iz ovoga proizlaze dvije pretpostavke koje nisu daleko od stvarnosti kada je transformator opterećen. To su: da su struja primara I_1 i struja sekundara I_2' jednake po intenzitetu, ali suprotne po smjeru, tj. $\bar{I}_1 = -\bar{I}_2'$; da su ampernavoji primara i sekundara jednaki i suprotni, tj. $I_1 N_1 = I_2 N_2$. Uzimajući u obzir i ove pretpostavke, koje je utvrdio Kap, dobili smo opšti vektorski dijagram opterećenog transformatora nazvan Kapovim dijagramom (sl. 1.17).

Na sl. 1.18. predstavljen je isti dijagram kada se vektor sekundarnog napona U_2 uzme kao vektor poređenja. Konstruiše se tako što od tačke 0 crtamo vektor U_2' pod uglom φ_2 prema vektoru struje I_1. Ugao φ_2 zadat je vektorom opterećenja, tj. prividnim otporom Z. Na vrh vektora U_2' paralelno sa strujom I_1 nanosimo



Sl. 1.18. Osnovni trougao Kapovog dijagrama (trougao kratkog spoja)

algebarski zbir aktivnih (omskih) padova napona transformatora $\bar{I}_1 (R_1 + R_2') = \bar{I}_1 R_k$. Okomito na njihov vrh nanosimo algebarski zbir induktivnih padova napona primarnog i sekundarnog svedenog na primar $\bar{I}_1 (X_1 + X_2') = \bar{I}_1 X_k$. Ovaj vektor prethodi vektoru struje I_1 za 90°. Spajanjem tačke 0 sa tačkom C dobivamo napon primara U_1, a spajanjem tačaka A i C (vrhovi vektora U_1 i U_2) dobivamo osnovni trougao ABC Kapovog dijagrama. On predstavlja trougao kratkog spoja. Jasno vidimo da se uz zadani napon primarnog namotaja U_1 napon sekundarnog namotaja U_2' dobiva jednostavno tako da se vektoru U_1 doda trougao kratkog spoja koji odgovara datoj struji I_1, tako da ugao φ_2 bude jednak zadatom.

Kapov dijagram dobio je veliki značaj zbog toga što je Kap ukazao na metodu po kojoj se pokusom može utvrditi osnovni trougao. To je tzv. Kapova metoda kratkog spoja. Trougao je potpuno određen ako su poznate jedna kateta i hipotenuza. Kap je uočio da pri pokusu kratkog spoja, tj. kad je napon na krajevima sekundarnog

namotaja nula ($U_2 = 0$), tačka 0 dijagrama sa sl. 1.18. prelazi u tačku A. Vektor $\overline{OC}$ koji predstavlja napon primara U_1 pada na vektor $\overline{AC}$. Iz toga možemo zaključiti da je vrijednost napona koji pri pokusu kratkog spoja treba da se održava na krajevima primara, da bi se u sekundarnom namotaju javila nominalna struja, predstavljena hipotenuzom osnovnog Kapovog trougla. Ako se sa U_k označi taj napon kratkog spoja, dobivamo:

$$U_k = \overline{AC} \qquad \ldots\ldots (1.61)$$

* * * * * * * * *

1.4.5. **Gubici snage i stepen korisnog djelovanja**

Gubici snage u transformatoru prema prirodi nastajanja mogu se razvrstati u magnetske, električne i dielektrične. Po mjestu gdje nastaju, razlikujemo gubitke u željezu P_{Fe}, gubitke u bakru P_{Cu} i gubitke u dielektriku P_d. I napokon, prema načinu mjerenja izdvajaju se gubici u praznom hodu P_0 i gubici u kratkom spoju P_k.

Magnetski gubici nastaju uslijed histereze P_h i vrtložnih (Fukovih) struja P_v, a nastaju u željeznoj jezgri, pa ih zato nazivamo još gubici u željezu P_{Fe}. Oni ostaju nepromijenjeni od praznog hoda do punog opterećenja i sačinjavaju većinu gubitaka pri praznom hodu.

Da bi smanjili gubitak snage uslijed vrtložnih struja, magnetsko kolo transformatora gradimo od međusobno izolovanih tankih limova, o čemu će biti više riječi kada budemo obrađivali konstruktivnu izvedbu transformatora. Gubitke uslijed histereze smanjujemo tako što upotrebljavamo tzv. transformatorske limove sa vrlo jakom primjesom silicija (oko 4% Si). Na koncu da kažemo da se gubici u željezu kreću oko 1% nominalne snage, pa ih zanemarujemo i kažemo da ne zavise od opterećenja, tj.

$$P_{Fe} = P_0 = \text{const.} \qquad \ldots\ldots (1.62)$$

Električni gubici ili gubici u bakru P_{Cu} su dvojaki: džulovski gubici I^2R i gubici uslijed nejednakosti gustine struje u presjeku provodnika. Obje ove vrste gubitaka nastaju u navojima i primara i sekundara. Pokusom kratkog spoja mjerenjem dolazimo do zbira svih električnih gubitaka.

Gubitke nastale uslijed nejednakosti gustine struje kod velikih presjeka smanjujemo na taj način što je provodnik sastavljen iz tankih, međusobno izolovanih paralelnih traka koje se smještaju tako da se nalaze u ravnini rasipnog magnetskog toka.

Dielektrični gubici nastaju uslijed pojave dielektrične histereze u krutim i tečnim izolacionim materijalima. Ovi gubici, naročito kod transformatora većih snaga, relativno su mali, pa ih možemo zanemariti.

Korisna (predana) električna snaga sekundarnog namotaja P_2 uvijek je manja od utrošene (dovedene, primljene) električne snage primarnog namotaja P_1 za onoliko koliko iznosi zbir gubitaka snage u transformatoru ΣP_g, pa dobivamo

$$P_1 = P_2 + \Sigma (P_g) \qquad \ldots\ldots (1.63)$$

Odnos između korisne i utrošene snage transformatora daje broj koji nam pokazuje koliko je transformator iskorišten, pa ga zato nazivamo stepenom korisnog djelovanja, tj.

$$\eta=\frac{P_2}{P_1} \qquad \ldots\ldots (1.64)$$

Dobiva se direktnom metodom tako što istovremeno pomoću vatmetara mjerimo korisnu snagu sekundara P_2 i utrošenu snagu primara P_1. Ova metoda je nepouzdana. Tačnije rezultate dobivamo primjenom indirektne metode, tj. ako pokusom praznog hoda utvrdimo gubitke u željezu P_{Fe}, a pokusom kratkog spoja gubitke u bakru P_{Cu} pri nekom po volji uzetom opterećenju P_2. Tako dobivamo:

$$\eta=\frac{P_2}{P_2+\Sigma P_g}=1-\frac{\Sigma P_g}{P_2+\Sigma P_g} \qquad \ldots\ldots (1.65)$$

Korisnu snagu transformatora P_2 izražavamo pomoću nominalne snage, tj.

$$P_2=k_{op}P_n\cos\varphi_2, \qquad \ldots\ldots (1.66)$$

gdje je:

k_{op} — koeficijent snage optrećenja

P_n — nominalna snaga transformatora

$\cos\varphi_2$ — faktor (sačinilac) snage sekundarnog sistema (tereta).

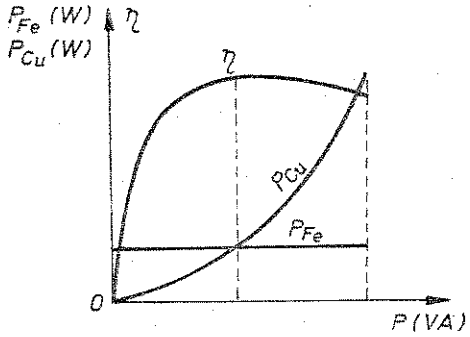
Gubici u željezu, kako smo već ranije kazali, ne zavise od opterećenja, pa je $P_{Fe}=P_0=$const., a gubici u bakru zavise od kvadrata struje, odnosno od kvadrata opterećenja, pa imamo:

$$P_{Cu}=k_{op}^2I_n^2R_k=k_{op}^2P_{kn} \qquad \ldots\ldots (1.67)$$

Ovdje je P_{kn} snaga koju transformator troši u kratkom spoju i pokriva gubitke u bakru pri nominalnoj struji I_n.

Uvrštavanjem formula 1.62, 1.66. i 1.67. u formulu 1.65. dobivamo:

$$\eta=1-\frac{P_{Fe}+P_{Cu}}{P_2+P_{Fe}+P_{Cu}}=1-\frac{P_0+k_{op}^2P_{kn}}{k_{op}P_n\cos\varphi_2+P_0+k_{op}^2P_{kn}} \qquad \ldots\ldots (1.68)$$



Sl. 1.19. Karakteristika stepena korisnog djelovanja transformatora

Stepen korisnog djelovanja uvijek je manji od jedan i kod transformatora iznosi oko 0,97. Ako dobiveni broj pomnožimo sa 100, dobivamo iskorištenje transformatora u postocima.

Ako na apscisnu osu koordinatnog sistema nanesemo prividnu snagu transformatora P, a na ordinatu vrijednost stepena korisnog djelovanja izračunatog pomoću formule 1.68. za odabranu vrijednost faktora snage $\cos\varphi_2$, dobićemo karakteristiku stepena korisnog djelovanja, tj. krivulju koja pokazuje kako se mijenja stepen korisnog djelovanja pri promjeni opterećenja transformatora (sl. 1.19).

Kako smo već ranije kazali, gubici u željezu pri svim opterećenjima od praznog hoda do nominalnog ostaju približno isti. Zato su na dijagramu predstavljeni linijom paralelnom sa apscisnom osi. Gubici u bakru, a i to smo ranije utvrdili, mijenjaju se s opterećenjem, i to s kvadratom struje, odnosno kvadratom opterećenja. Zato su na dijagramu gubici u bakru predstavljeni parabolom.

Ako posmatramo porast opterećenja od nule, vidjećemo da su gubici u bakru u početku manji od onih u željezu, a kasnije se pri nekom opterećenju izjednače sa gubicima u željezu. To je značajno, jer je pri tom opterećenju najveći stepen iskorištenja snage u transformatoru. Koeficijent snage opterećenja pri kome se javlja maksimalni stepen iskorištenja bira konstruktor transformatora, mijenjajući odnos $P_0:P_{kn}$, jer je:

$$k_{op}=\sqrt{\frac{P_0}{P_{kn}}}$$

Zbog odnosa cijena bakra i željeza, najčešće se uzima $P_0:P_{kn}=1:4$, što daje $k_{op}=0{,}5$, tako da maksimalni stepen iskorištenja nastaje pri polovini nominalnog opterećenja.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta znači opteretiti transformator?
2. Objasni način rada opterećenog transformatora!
3. Kako se mijenja glavni magnetski tok pri promjeni opterećenja?
4. Kojom vrstom trošila može transformator biti opterećen?
5. Nacrtaj vektorski dijagram transformatora čiji je sekundar induktivno opterećen!
6. Kako vršimo pojednostavljenje dijagrama opterećenog transformatora?
7. Nacrtaj Kapov dijagram, objasni šta on predstavlja i koje veličine pomoću njega možemo utvrditi!
8. Koji gubici snage nastaju u transformatoru i koji je uzrok njihovog nastanka?
9. Šta je stepen korisnog djelovanja transformatora, kako se dobiva, šta nam pokazuje i pri kome će opterećenju transformatora biti optimalan?

1.5. KONSTRUKTIVNA IZVEDBA TRANSFORMATORA

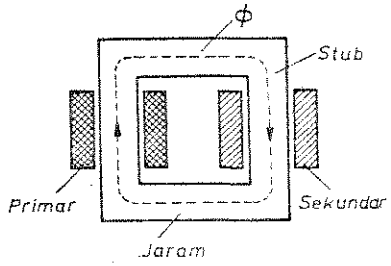
Iz dosadašnjeg izlaganja nije teško zaključiti da se transformator sastoji iz dva osnovna dijela: *magnetskog kola (jezgra)* i *namotaja*. Ova dva dijela aktivno učestvuju u transformaciji električne energije, dok ostali dijelovi, o kojima će također biti govora, doprinose ukupnom radu transformatora.

1.5.1. **Magnetsko kolo (jezgra) transformatora**

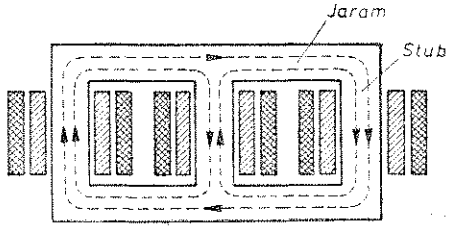
Prema broju faza transformatore dijelimo na *jednofazne* i *trofazne*.

Prema obliku magnetskog kola (jezgre) transformatori mogu biti:

— *stubni (jezgrasti) sa spregnutim magnetskim tokovima* (namotaj obuhvata jezgru) (slike 1.20 i 1.21),

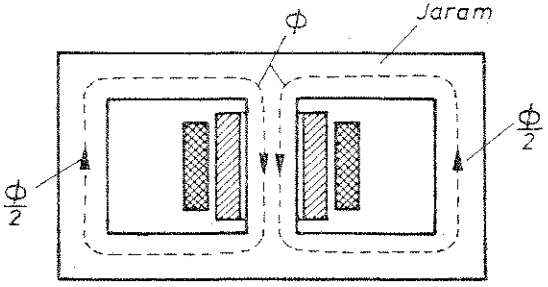


Sl. 1.20. Stubni (jezgrasti) tip jednofaznog transformatora



Sl. 1.21. Stubni (jezgrasti) tip trofaznog transformatora

— *ogrnuti (oklopni) sa nespregnutim magnetskim tokovima* (namotaj djelimično obuhvaćen jezgrom) (sl. 1.22).



Sl. 1.22. Ogrnuti (oklopni) tip jednofaznog transformatora

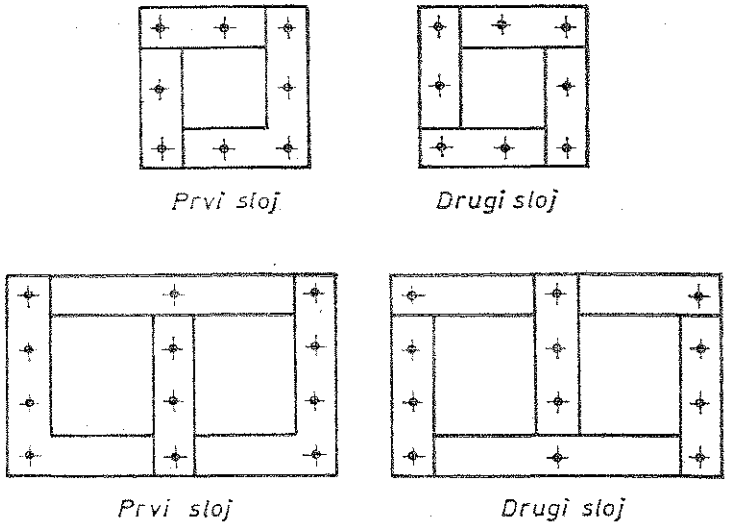
Jednofazni i trofazni stubni (jezgrasti) transformatori imaju presjek stuba isti kao i jaram, kako je predstavljeno na slikama 1.20. i 1.21, dok kod jednofaznih ogrnutih (oklopnih) transformatora jarmovi i krajnji stubovi imaju polovični presjek unutrašnjeg stuba, na kome su smješteni namotaji, jer kroz njih prolazi polovični magnetski tok. Kod jednofaznih transformatora primarni i sekundarni namotaj mogu biti smješteni na jezgro odvojeno na dva stuba (sl. 1.20), dok je češća izvedba kada su oba namotaja skupa na jednom stubu (sl. 1.22).

Da bi se postiglo što potpunije obuhvatanje magnetskim tokom, potrebno je da magnetsko kolo transformatora bude napravljeno od materijala što veće magnetske provodnosti. Taj materijal su željezo i čelik. Ovi materijali omogućavaju da se postignu dovoljno velike vrijednosti magnetskih tokova uz što manje histrezne

gubitke. Od svih feromagnetskih materijala ovom zahtjevu najbolje udovoljava željezo, koje sadrži od 0,5 do 5% silicija. Pri izradi transformatorskog jezgra upotrebljava se željezo u obliku tankog lima debljine 0,5 i 0,35 mm, a u novije vrijeme uzima se lim debljine 0,3 mm pa i manje da bi gubitke nastale uslijed vrtložnih struja sveli na što razumniju mjeru. Transformatorski limovi se izrađuju hladnim i toplim valjanjem. Zbog mnogo manjih specifičnih gubitaka (računaju se pri magnetskoj indukciji od 1 T i frekvencije od 50 Hz) i mnogo povoljnije krivulje magnećenja, danas se praktično pri gradnji transformatora upotrebljava hladnovaljani lim izuzev kod transformatora malih snaga za čiju izradu se upotrebljava toplovaljani lim.

Da bi se smanjili gubici uslijed vrtložnih struja, na limove se stavlja izolacija. Ona može biti izvedena lijepljenjem tankog papira samo sa jedne strane lima čija se debljina kreće oko 0,03 mm i lakiranjem čiji nanos je s jedne ili s obje strane lima. Izolacija lakom može izdržati vrlo visoke temperature, čak i kada dođe do žarenja lima. Debljina izolacionog sloja iznosi oko 0,02 mm. Danas se vrlo često izolacija lima izvodi oksidacijom kao i naročitom hemijskom ili elektrohemijskom obradom. Oksidacija lima je vrlo jednostavna. Debljina sloja izolacije je povoljna (oko 0,006 mm), ali ovakva izolacija nije mehanički otporna npr. pri stezanju limova jezgre. Debljina izolacije kod nekih vrsta hemijskih i elektrohemijskih postupaka iznosi nekoliko mikrona.

Prilikom slaganja limova, njihova izolacija, nejednaka debljina, hrapavost površine uzrokuju smanjenje efektivnog presjeka jezgre. Tako npr. kod jezgre sastavljene od toplovaljanog lima izolovanog papirom efektivni presjek iznosi oko 85% od ukupnog presjeka jezgre. Kako se kod proračuna transformatora uzima u



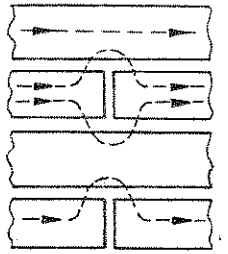
Sl. 1.23. Slaganje limova jezgre kod jednofaznih i trofaznih transformatora

obzir samo korisni željezni presjek, uvodi se pojam faktora punjenja željezom. To je odnos efektivnog (čistog) i ukupnog (stvarnog) presjeka jezgre:

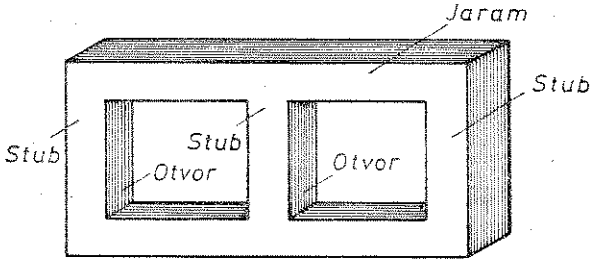
$$f_p = \frac{A_{ef}}{A_{uk}} \qquad \ldots\ldots (1.69)$$

On iznosi npr. za lim debljine 0,35 mm i razne vrste izolacija $0,85 \div 0,96$.

Osnovni način sastavljanja jezgre vrši se slaganjem limova. To slaganje se mora izvesti tako da *zračni zazor (međuželjezo)* u jezgri bude što manji, jer on predstavlja za magnetski tok veliki otpor. To postižemo preklapanjem limova kao što je predstavljeno na sl. 1.23. Limove slažemo naizmjenično, tj. sloj 1 uvijek dolazi na sloj 2, tako da puno željezo u jednom sloju prekriva zračni zazor u drugom sloju (sl. 1.24). Tako sastavljeni i naslagani slojevi limova čine magnetsko kolo (jezgru) transformatora (sl. 1.25). Kako se sa slike vidi, magnetsko kolo sastoji

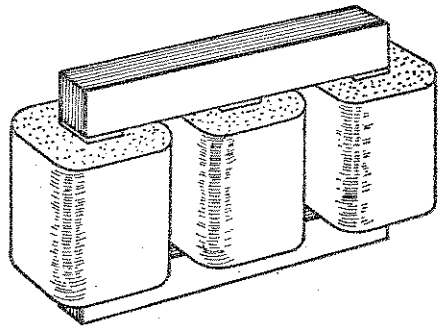


Sl. 1.24. Prelaz silnica magnetskog toka kod slaganih limova



Sl. 1.25. Magnetsko kolo (jezgra) trofaznog transformatora

se od *stubova* i *jarmova* koji povezuju stubove. Otvor između stubova i jarmova služi za smještaj namotaja. Kada namotaje stavimo na stubove, onda zatvaramo magnetsko kolo jarmovima (sl. 1.26). Da bi magnetski otpor bio što manji, potrebno je da zračni raspor na sastavcima jezgra sa jarmovima bude što manji. To se postiže tzv. priljubljivanjem jarma na jezgro uz upotrebu izolacije i zavrtanja i ukrštanjem limova.

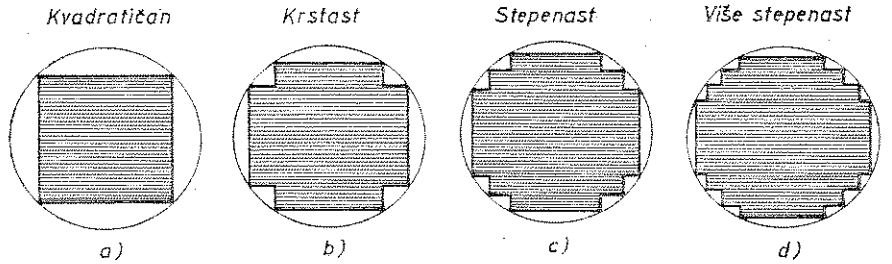


Sl. 1.26. Magnetsko kolo (jezgra) sa namotajima trofaznog transformatora

Oblik presjeka željezne jezgre prilagođava se obliku namotaja. Zbog izvjesnih prednosti kružnih namotaja, jezgra se izraduju tako da im se presjek što više približava krugu. Da krug bude što potpunije ispunjen, potrebno je upotrijebiti veliki broj limova raznih širina, kako je predstavljeno na sl. 1.27. Sa slike se vidi da se za jezgru transformatora malih snaga (nekoliko kVA) upotrebljavaju limovi jednake širine (kvadratičan presjek), a za

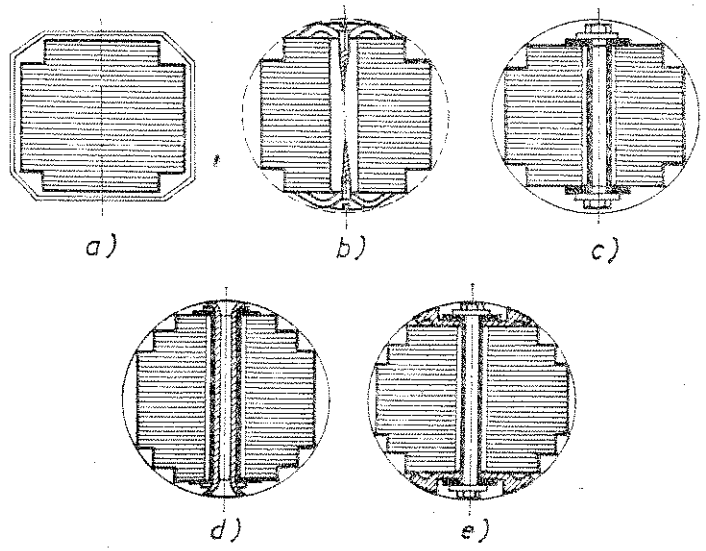
jezgru većih transformatora upotrebljavaju se limovi sa tri i više širina (krstast, stepenast i višestepenast presjek).

Limovi iz kojih je, kako smo već kazali, složeno magnetsko kolo (jezgra) moraju biti čvrsto stegnuti, inače drhte i bruje uslijed naizmjeničnog magnećenja



Sl. 1.27. Razni presjeci jezgre transformatora: a) kod sasvim malih transformatora, b) kod nešto većih transformatora, c) kod srednjih transformatora, d) kod velikih transformatora.

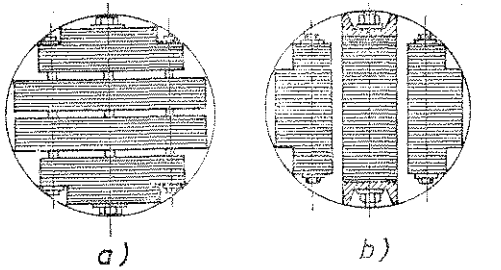
pri radu transformatora. To je prikazano na sl. 1.28. Kod malih transformatora pritezanje limova vrši se obavijanjem „bandažiranjem" pamučnom trakom ili užetom. Kod nešto većih transformatora (do nekoliko desetina kVA) pritezanje limova u stubovima vrši se samo drvenim umecima koji se stavljaju između izolacionog valjka i mase stuba. Kod transformatora još većih snaga stezanje limova vrši se pomoću vijaka ili zakivaka koji prolaze kroz stub ili jaram, kako je to prikazano na sl. 1.28c, d, e. Pri postavljanju vijaka ili zakivaka treba paziti da ne dođe do



Sl. 1.28. Razni načini pritezanja limova: a) kod malih transformatora, b) c) d) i e) kod većih transformatora.

kratkog spoja među limovima. Zato vijke ili zakivke izolujemo od jezgre pomoću cijevi od izolacionog papira (prespan), a pod navrtke, odnosno glave zakivka stavljamo podmetače od istog materijala.

Radi boljeg hlađenja jezgra i jarmovi stubnih transformatora izvode se sa ventilacionim kanalima. Da bi se obezbijedilo slobodno strujanje rashladnog sredstva kroz kanale, potrebno je da ona budu dovoljno široka (6 ÷ 10 mm za ulje i 15 mm za vazduh). Ventilacioni kanali smještaju se između pojedinih paketa limova, a mogu biti uzdužni, tj. u ravni limova (sl. 1.29a) i poprečni, okomiti na ravan limova (sl. 1.29b). Lakše je izvesti uzdužne kanale, ali toplota se bolje odvodi poprečnim kanalima, jer rashladno sredstvo struji direktno po željezu.

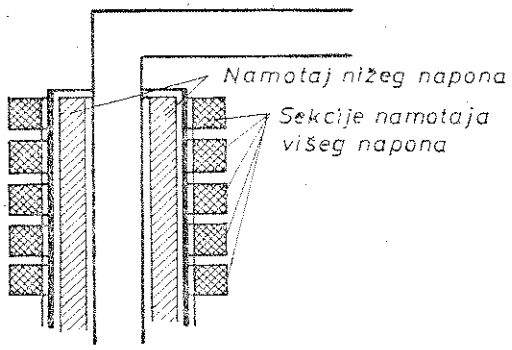


Sl. 1.29. Ventilacioni kanali (promajišta) u jezgri transformatora: a) uzdužni u ravnini limova, b) poprečni (okomiti) na ravan limova.

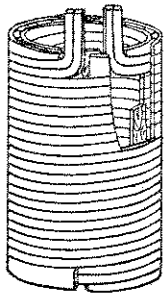
1.5.2. **Namotaji transformatora**

Do sada smo ne samo čuli nego i naučili da se namotaji primara i sekundara smještaju oko jezgra tako da bi oba bila obuhvaćena magnetskim tokom. Kako svaki namotaj može biti primar i sekundar, mi ih razlikujemo po visini napona. Naime, jedan nazivamo namotaj višeg napona (VN), a drugi namotaj nižeg napona (NN). Prema načinu postavljanja i međusobnog položaja namotaja, razlikujemo: *koncentrične* i *naporede namotaje.*

Koncentrične namotaje također nazivamo *cilindričnim, cijevnim* ili *valjkastim,* jer su primar i sekundar postavljeni oko jezgra u vidu cilindra, cijevi ili valjka, kako je to prikazano na sl. 1.30.



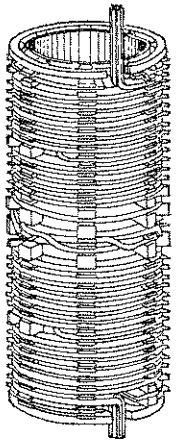
Sl. 1.30. Koncentrični namotaji — namotaj prikazan samo na jednom stubu



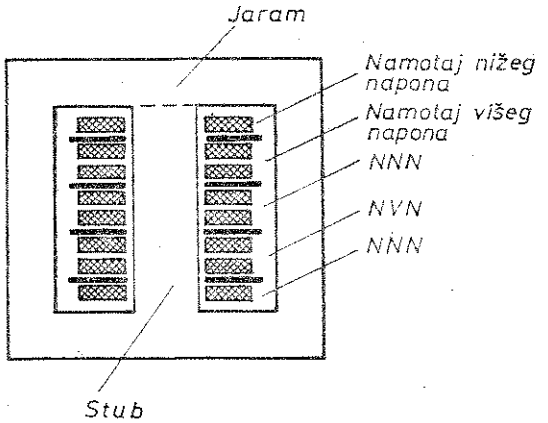
Sl. 1.31. Cilindrični dvoslojni namotaj nižeg napona

Kod koncentričnih namotaja bliže jezgru smješten je namotaj nižeg napona, jer se lakše izoluje prema jezgri. Za izolaciju jednog namotaja od drugog upotrebljavaju se izolacioni cilindri. Preko izolovanog cilindra koncentrično je smješten namotaj višeg napona koji je podijeljen na više sekcija.

Najjednostavniji oblik koncentričnog namotaja je cilindrični namotaj napravljen od bakarnog pravouglog ili okruglog profila namotan u obliku spiralnog svitka. Kada imamo malo navoja, cilindrični namotaj se izvodi kao dvoslojni, a kada ih imamo više, onda se izvodi kao višeslojni. Na sl. 1.31. predstavljen je cilindrični dvoslojni namotaj nižeg napona. On se izvodi tako što se na dva koncentrična valjka od specijalnog kartona namotaju bakreni pravougli profili. Ovakav namotaj upotrebljava se kao namotaj nižeg napona za trofazne transformatore nominalnih snaga oko 1000 kVA i za napone od 500 V. Kod transformatora znatnih snaga moramo poboljšati uslove odvođenja toplote. To činimo tako što namotaj izvodimo u obliku pločastih svitaka između kojih se ostavljaju ventilacioni kanali širine od 5 do 8 mm (sl. 1.32).



Sl. 1.32. Cilindrični spiralni namotaj nižeg napona izveden u obliku pločastih svitaka sa ventilacionim kanalima



Sl. 1.33. Naporedni namotaji jednofaznog ogrnutog transformatora

Naporede namotaje još nazivamo *kolutni* ili *prstenasti*, jer su im primar i sekundar u vidu kolutova ili prstena naizmjenično poredani oko jezgra jedan pored drugog, kako je to prikazano na sl. 1.33. Prilikom izvedbe vodimo računa da su koluti nižeg napona bliže jarmu, npr. ako imamo tri koluta višeg i tri nižeg napona, onda kolut nižeg napona dijelimo na dva dijela i oni su najbliži jarmu. Naporedi namotaji primjenjuju se kod ogrnutih transformatora, a njihov oblik je pravougaoni ili kružni. Iz razloga što mnogo bolje izdržava naprezanja koja nastaju pri kratkim spojevima transformatora, češće se upotrebljava kružni oblik namotaja od pravougaonog.

Upoređujući koncentrične namotaje sa naporedim, dolazimo do sljedećih zaključaka:

U pogledu izolacije namotaja, koncentrični namotaji su sigurniji, jer se izolacioni cilindar može izraditi iz jednog komada bez nastavka, dok kod naporedih namotaja izolacija se sastoji od više dijelova (izolacionih prstenova) između kolutova i izolacionog cilindra (valjka) između jezgra i namotaja. Utrošak izolacije je veći kod naporedih namotaja, jer se svaki kolut od susjednog izoluje za puni napon.

Što se tiče hlađenja, koncentrični namotaji su pogodniji, jer prostori između namotaja omogućavaju nesmetanu prirodnu cirkulaciju ulja ili vazduha, dok je kod naporedih namotaja položaj prostora između kolutova okomit na prirodni smjer cirkulacije ulja ili vazduha, čime se smanjuje sposobnost hlađenja namotaja.

Kod koncentričnih namotaja rasipanje magnetskog toka je veće, a time je veći i induktivni pad napona, pa u tom pogledu naporedi namotaji imaju prednost.

Iz ovih upoređenja nije teško zaključiti da su koncentrični namotaji za izradu jednostavniji, u radu pouzdaniji, a i jeftiniji, pa se zato namotaji transformatora uglavnom izrađuju kao koncentrični. Zbog slabijeg hlađenja upotreba naporedih namotaja ograničena je uglavnom na transformatore sa stubovima u vodoravnom položaju kao kod regulacionih transformatora i kod transformatora za vrlo velike struje.

Materijali koji se upotrebljavaju za izradu namotaja su čisti elektrolitski bakar i aluminijum. Aluminijum se rjeđe upotrebljava, jer je neekonomičan. Najčešće upotrebljavamo meki bakar, jer je s njime lako raditi, dok se kod transformatora većih snaga upotrebljava tvrdi bakar veće čvrstoće da bi se izdržale velike sile koje se javljaju prilikom kratkog spoja.

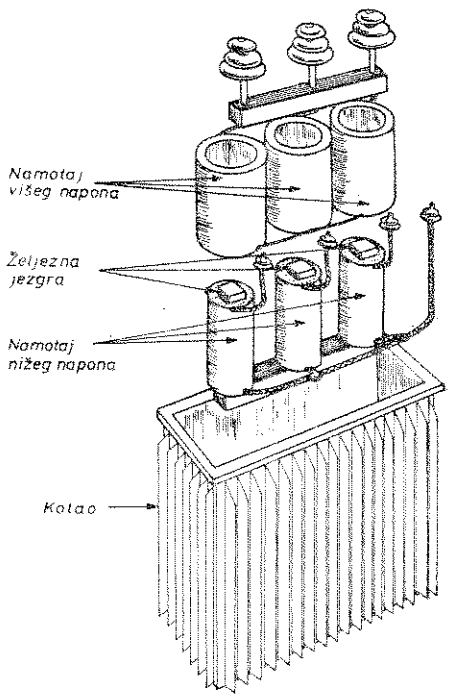
Najčešće se upotrebljava bakar u obliku kružnog ili pravougaonog profila. Promjeri bakrene žice su normirani i kreću se od 0,03 do 6 mm. Pravougli presjeci nisu normirani. Okrugla bakrena žica izolovana pamukom ili lakom upotrebljava se s promjerom uglavnom do 4 mm. Ako želimo veće presjeke, koristimo pravougle bakrene profile izolovane pamukom ili papirom.

Za međusobnu izolaciju namotaja kao i prema željeznoj jezgri upotrebljavamo pamuk, sintetički lak, svilu, kvalitetan papir, drvo, mineralna i sintetička ulja itd. Ovi materijali moraju biti otporni i na transformatorsko ulje, odnosno ne smiju uticati na smanjenje njegovih izolacionih sposobnosti. Tako kod transformatora koji se nalaze u ulju za namotaj ne smijemo upotrijebiti goli bakar zbog toga što on kao katalizator stvara talog u ulju, a to smanjuje njegovu izolacionu sposobnost. Izolacione sposobnosti tih materijala zavise i od temperature. Granična temperatura najviša je dozvoljena temperatura za neki izolacioni materijal, npr. kod uljnih transformatora za izolaciju upotrebljavamo papir, kartonit (prešpan), slojevito drvo, uljni žični lakovi, uljno platno itd., čija je granična temperatura 105°C, dok je za sintetičke žične lakove, bakelit, tekstolit, pertinaks, lak, platno i druge granična temperatura 120°C. Kod suhih transformatora za izolaciju upotrebljavamo staklena vlakna, mikanit, mikafoliju, azbest i druge kod kojih je granična temperatura 130°C. Postojanost mineralnih ulja koje upotrebljavamo za transformatore uveliko zavisi od temperature na kojoj se nalaze. Njihova granična temperatura u gornjim slojevima iznosi 95°C. Prekoračenjem dozvoljene temperature ulje se može zapaliti, pa se time ograničava upotreba uljnih transformatora. Zato se umjesto mineralnih ulja upotrebljavaju sintetička ulja, tzv. „askareli", koji su nezapaljivi, a imaju izolacione osobine slične mineralnim uljima. Pošto su transformatori sa sintetičkim uljima skuplji za oko 25% od transformatora s mineralnim uljima, u posljednje vrijeme sve češće se za izolaciju namotaja suhih transformatora upotrebljavaju silikonski lakovi koji dozvoljavaju i više radne temperature.

1.5.3. **Pomoćni dijelovi transformatora**

Pored dva glavna dijela, željeznog jezgra i namotaja, energetski transformatori imaju i pomoćne dijelove. To su *kotao, konzervator (dilataciona posuda), provodni izolatori, Buholcov relej, pokazivač ulja, termometar, sušionik vazduha, zavrtanj za vezu sa zemljom* i drugo.

Kotao. Transformatore većih snaga smještamo u kotao napravljen od čeličnog lima. Njegova debljina zavisi od veličine transformatora i kreće se od 0,8 do 8 mm. Kotao je napunjen uljem koje služi kao izolacija (tri puta veća od vazduha), a služi i za hlađenje, o kome će kasnije biti govora. Na sl. 1.34. prikazan je principijelno kotao i van njega rastavljeni željezna jezgra i namotaji nižeg i višeg napona. Kada određenim redom transformatorske dijelove smjestimo u kotao, napunimo ga uljem i odozgo poklopcem zatvorimo. Poklopac kotla, koji je napravljen od debljeg čeličnog lima, mehanički je vezan sa transformatorom, tako da se u slučaju kvara ili remonta zajedno sa njim može izvaditi iz kotla. Poklopac se za kotao pričvršćuje zavrtnjima, a između njih, po ivici gdje su zavrtnji stavlja se zaptivač od kartonita, vještačke gume i drugo.



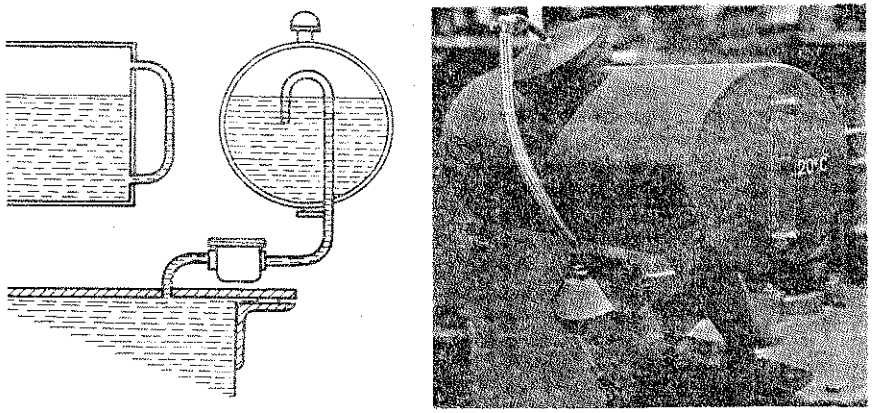
Sl. 1.34. Kotao transformatora sa izvađenim namotajima i željeznom jezgrom

Na poklopcu kotla imamo poseban „džep" u koji se stavlja termometar (običan živin od 0 do 125°C) čiji je zadatak da mjeri temperaturu ulja u gornjim slojevima kotla. U donjem dijelu kotla nalazi se otvor za ispuštanje ulja, zavrtanj za uzemljenje i točkovi za lakše manipulisanje.

Konzervator. Transformatorsko toplo ulje ne smije doći u direktni dodir sa vazduhom, posebno ne velika površina, jer bi moglo oksidirati i ovlažiti se. Upravo je funkcija konzervatora da spriječi prodiranje vlage iz vazduha smanjujući površinu između njih. Ako bi, ipak, došlo do dodira ulja i vazduha, onda se radi o znatno manjoj površini, a i nižoj temperaturi nego u kotlu, pa je nepovoljan uticaj vazduha na ulje u kotlu neznatan.

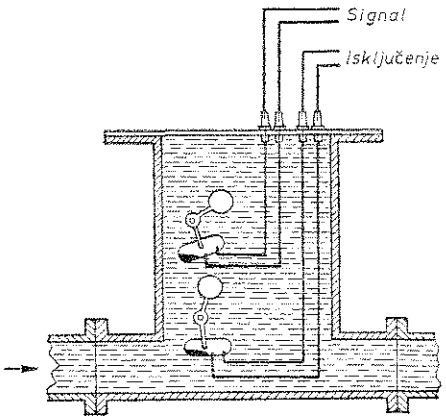
Konzervator je valjkasta posuda desetak puta manje zapremine od kotla, smještena na poklopcu kotla. Pomoću tanke cijevi je spojen s kotlom transformatora, a visinu nivoa ulja posmatramo na *pokazivaču ulja* koji je na njemu ugrađen (sl. 1.35). Cijev koja spaja kotao i konzervator ulazi nešto iznad dna konzervatora i savijena je tako da njen otvor bude ispod nivoa ulja.

Pri zagrijavanju ulje se širi i teče prema konzervatoru, a kada se ohladi, vraća se natrag u kotao. Konzervator u kome je ulje uvijek hladno omogućava da pri svakoj temperaturi kotao bude ispunjen njime. Konzervator je dimenzionisan za promjenu zapremine ulja pri temperaturi ulja od −25°C do 100°C. Ukoliko vazduh i uđe u konzervator, on ovlaži i oksidira samo taj dio ulja, dok ulje u kotlu ostaje čisto. Još da kažemo da konzervator ima otvor kroz koji ispušta gasove, a ulazi vazduh.



Sl. 1.35. Konzervator

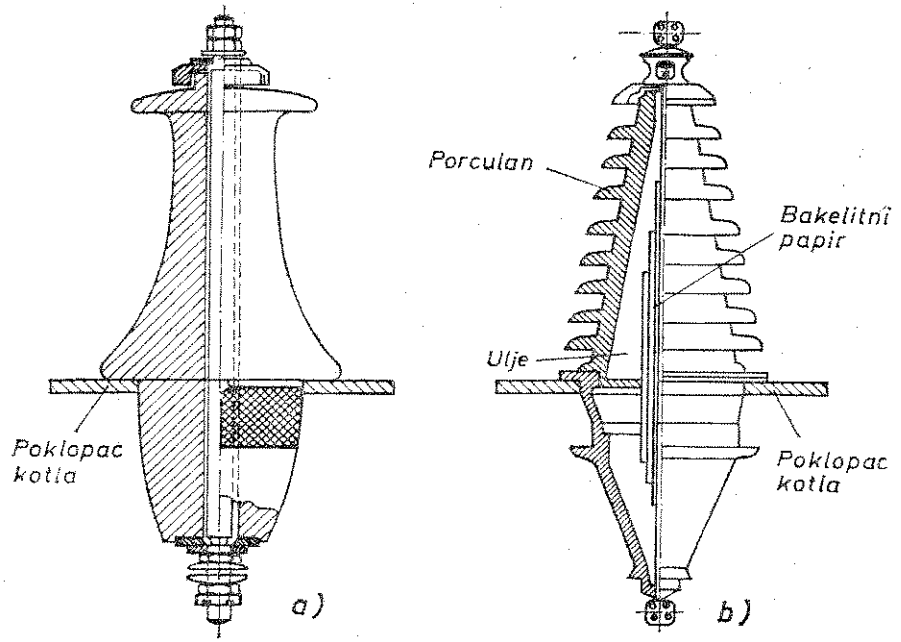
Da zaključimo: konzervator odvaja ulje u kotlu od vlažnog vazduha svana i eventualnu vlagu i prljavštinu nastale uslijed oksidacije prikuplja na svom dnu. Uslijed promjenljivog opterećenja mijenja se temperatura transformatora, a time i zapremina ulja u konzervatoru, pa popularno kažemo da „transformator diše".



Sl. 1.36. Buholcov ili gasni relej

Buholcov relej. Na cijevi koja spaja kotao transformatora i konzervatora postavlja se zaštitna naprava koju nazivamo *Buholcov relej*, a u posljednje vrijeme često i *gasni* ili *plinski relej*. Sastoji se od jedne posude u kojoj se nalaze jedna ili dvije živine sklopke s jednim ili dva plovka. Pri normalnom radu transformatora posuda je puna ulja i plovak (plovci) potisnut prema poklopcu posude. Kako radi ovaj relej. Vrlo jednostavno. Pri svakom unutrašnjem kvaru transformatora nastaje električni luk uslijed čega dolazi do isparavanja ulja. Pošto su lakši od ulja, mjehurići nastalog gasa teže da idu prema gore, tj. da izađu iz kotla prema konzervatoru. Na tom putu nailaze na Buholcov relej i svojim pritiskom smanjuju nivo ulja u posudi. Slijedeći opadanje nivoa ulja, gornji plovak ide naniže i u jednom trenutku zatvara kontakte živine sklopke, odnosno električno kolo releja koje odmah komanduje uzbunu (svjetlosni ili zvučni signal) i upozorava na neki kvar. Ukoliko u transformatoru dođe do nekog većeg kvara, npr. kratkog spoja pa dođe do požara željezne jezgre, nivo ulja još više opada zbog naglog nastajanja veće količine mjehurića gasa. Tada drugi plovak preko živine sklopke zatvori električno kolo u kojem se nalazi prekidač koji odmah isključuje transformator iz pogona.

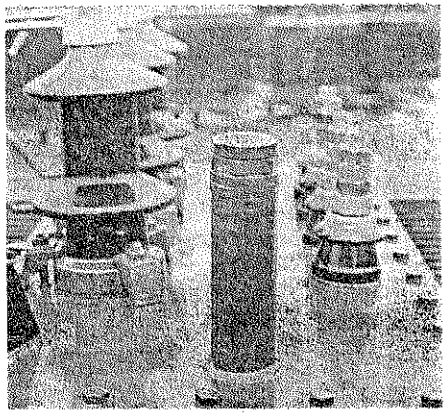
Provodni izolatori. Kod uljnih transformatora provodni izolatori (uvodnice) izoluju krajeve namotaja ili izvode koji vode od stezaljki namotaja u kotlu, kroz njegov poklopac na stezaljke za vanjski odvod. Da pri visokom naponu ne bi došlo do proboja, u prolazu kroz poklopac kotla provodni izolator mora biti dovoljno čvrst ne samo mehanički već i izolacijski. Provodni izolator je napravljen od porculana (sl. 1.37). Njegov veći dio je van kotla, a manji u kotlu. To je zbog toga što je ulje bolji izolator od vazduha.



Sl. 1.37. Provodni izolatori: a) do 35 kV, b) više od 35 kV.

Veličina provodnih izolatora zavisi od napona za koji je namijenjen. Ukoliko je veličina napona do 35 kV, unutrašnjost provodnog izolatora ispunjena je vazduhom, a bakrena šina ili cijev obuhvaćena je cilindrom od bakelitnog papira debljine

6 do 8 mm. Pri naponima višim od 35 kV, unutrašnjost provodnog izolatora ispunjena je izolacijskom masom, npr. uljem.



Sl. 1.38. Provodni izolatori smješteni na poklopcu kotla

Na poklopcu kotla se provodni izolatori smještaju tako da se na jednoj strani nalaze oni sa višim naponom, a na drugoj oni sa nižim naponom, kako se vidi na sl. 1.38.

1.5.4. **Hlađenje transformatora**

Iz dosadašnjeg izlaganja je jasno da se pri radu transformator zagrije. Do zagrijavanja dolazi usljed džulovih gubitaka u namotajima primara i sekundara i gubitaka u željeznoj jezgri koji nastaju usljed histereze i vrtložnih struja. Da ne bi bio izložen oštećenju ili eventualnom uništenju, izolacijski materijal namotaja ne smije imati maksimalnu dopuštenu temperaturu, kod suhih transformatora 95°C, a kod transformatora u ulju 100°C.

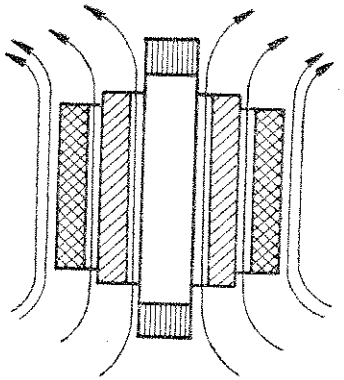
Ukoliko je transformator u svom radu nominalno opterećen, tj. snagom za koju je građen, onda to opterećenje može biti trajno, a da mu temperatura namotaja ne poraste iznad dozvoljene granice. Na najveću dozvoljenu temperaturu utiče i temperatura okolnog vazduha, npr. ako je 20°C, onda temperatura opterećenog transformatora ne smije preći 75°C. Zbir temperature transformatora prije opterećenja (20°C) i porasta opterećenja (75°C) čini najveću dozvoljenu temperaturu.

Iz svega izloženog nije teško zaključiti da moramo spriječiti eventualno prekoračenje porasta temperature, što je opasno po upotrijebljene izolacione materijale, a i sami transformator. Iz tog razloga, osobitu pažnju moramo posvetiti hlađenju transformatora. U prvom redu, njegova konstruktivna izvedba u znatnoj mjeri zavisi od načina njegova hlađenja. Na osnovu toga razlikujemo:

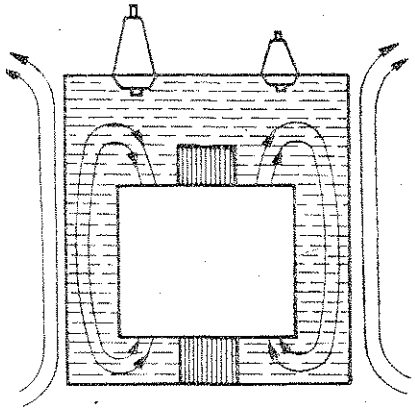
— *transformatore koji se hlade prirodnim strujanjem vazduha ili ulja i*

— *transformatore koji se hlade prinudnim (pojačanim) strujanjem vazduha ili ulja.*

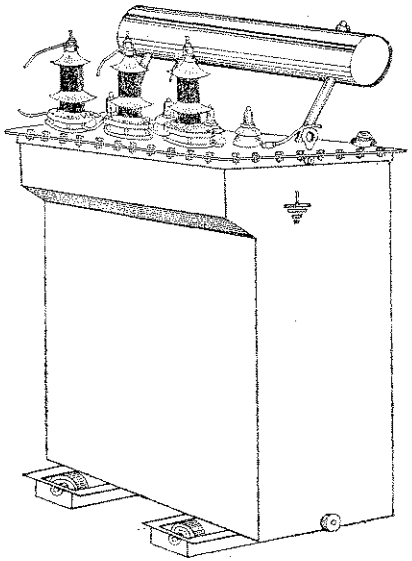
Transformatori koji su otvoreni i hlade se samo vazduhom nazivamo *suhim* transformatorima. Kod njih se stvara prirodna struja vazduha koja ližući tople površine namotaja i željeznog jezgra odnosi toplotu s njih (sl. 1.39). Budući da koeficijent odvođenja toplote u vazduh nije velik, suhi transformatori s prirodnim



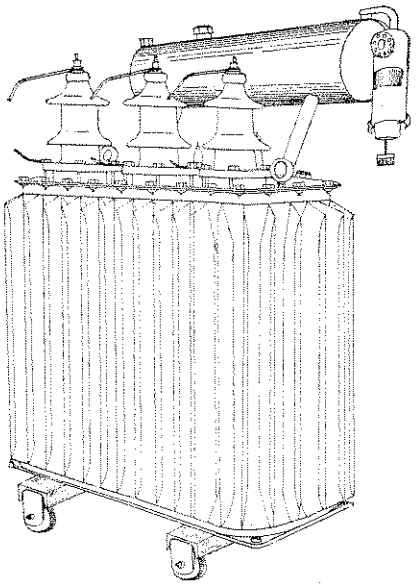
Sl. 1.39. Hlađenje suhih transformatora prirodnim strujanjem vazduha



Sl. 1.40. Hlađenje uljnih transformatora prirodnim strujanjem vazduha i ulja



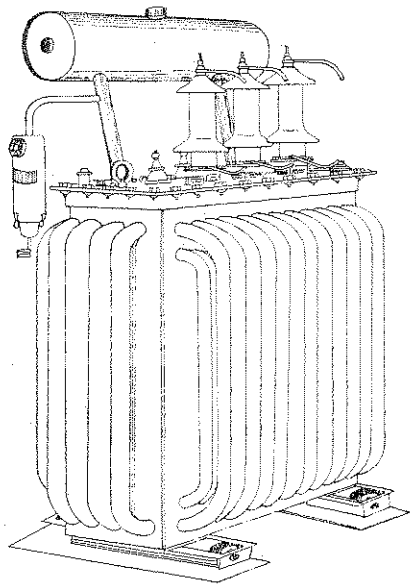
Sl. 1.41. Trofazni mali uljni transformator u kotlu sa ravnim zidovima snage 30 kVA



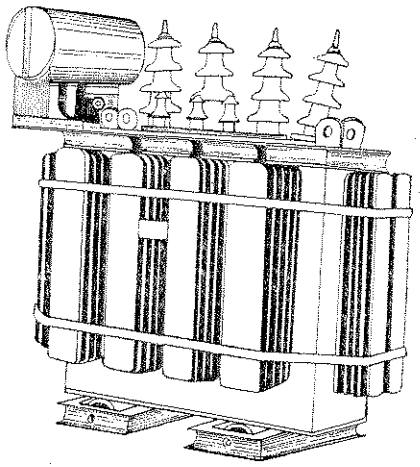
Sl. 1.42. Trofazni uljni transformator u kotlu sa zidovima od valovitog lima snage oko 50 kVA

hlađenjem obično gradimo za male snage i za napone od 6 do 10 kV. Da bismo poboljšali hlađenje, između namotaja koje dijelimo stavljamo aluminijske limove, pa time povećavamo površinu hlađenja, tj. površinu za odvođenje toplote.

Danas su najznačajniji transformatori koji se stavljaju u kotao s uljem. Nazivamo ih *uljnim* transformatorima. Ulje ima oko desetak puta veći koeficijent odvođenja toplote od vazduha, pa će sa namotaja za toliko puta brže biti odvođena toplota. Na sl. 1.40. prikazano je hlađenje transformatora u ulju prirodnim strujanjem vazduha. Naime, namotaji i jezgro transformatora zagrijavanjem postaju topliji od ulja, usljed čega dolazi do njegovog strujanja unutar kotla. Na taj način ulje prenosi toplotu sa toplih površina transformatora na hladne zidove kotla. Usljed nastale razlike temperatura između zidova kotla i okolnog vazduha, oko površine kotla se javlja prirodno strujanje vazduha. Naravno, toplota sa površina kotla odlazi i zračenjem. Kotao sa ravnim zidovima primjenjuje se za transformatore manjih snaga (do 30 kVA) (sl. 1.41). Za transformatore većih snaga površina kotla se mora vještački povećati. To se čini na taj način što se bočni zidovi kotla izrađuju od valovitog lima za transformatore do 50 kVA (sl. 1.42). Kod transformatora srednjih snaga (od 50 do 4 000 kVA) povećane su površine hlađenja cije-



Sl. 1.43. Trofazni uljni transformator u kotlu sa ugrađenim cijevima za hlađenje — tropski tip za zagrijanost okoline iznad 35°C, snage 100 kVA



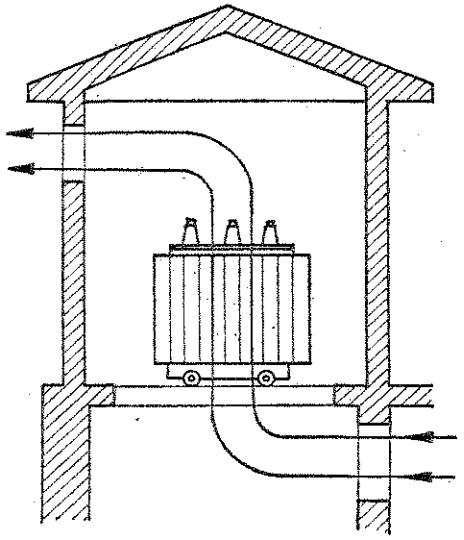
Sl. 1.44. Trofazni uljni transformator u kotlu s ugrađenim radijatorima za hlađenje

vima u nekoliko redova čije su bočne strane zavarene u kotlove. Kroz navedene cijevi će strujati ulje (sl. 1.43). Promjer tih cijevi je oko 50 mm. I najzad, da bi se još više povećala površina hlađenja, na zidove kotla ugrađuju se radijatori. To

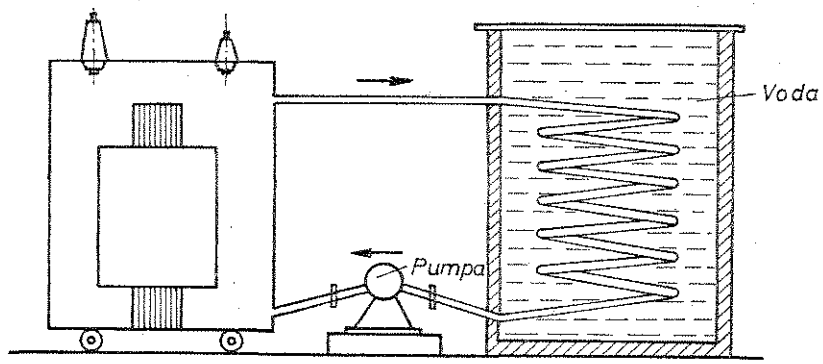
su kotlovi tzv. radijatorskog tipa s prirodnim strujanjem zraka, koji se upotrebljavaju za transformatore većih snaga (više od 1 000 kVA) (sl. 1.44).

Sve ovo što smo do sada naveli odnosi se samo na povećanje površine hlađenja, dok je površina zračenja neznatno povećana. Pošto strujanje vazduha ima glavnu ulogu u odnošenju toplote sa transformatorskog kotla, kod transformatora velikih snaga (više od 10 MVA) moramo primijeniti prinudno (pojačano) strujanje. To postižemo ventilatorima snage od 150 do 200 W, koji se smještaju na prikladna mjesta u radijatorskom rashladnom sistemu. Prostorija u kojoj se nalazi transformator treba da ima otvore za ulaženje hladnog i izlaženje toplog vazduha, kako je to prikazano na sl. 1.45.

Kod transformatora vrlo velikih snaga (više od 10 MVA) primjenjuje se naročiti sistem hlađenja. Njegova je suština u tome što se ulje pumpom prinuđuje na strujanje kroz spiralnu cijev koja je smještena u hladnu vodu gdje se



Sl. 1.45. Prostorija za transformator sa otvorima za ulaz hladnog i izlaz toplog vazduha



Sl. 1.46. Hlađenje transformatora većih snaga (preko 10 MVA) prinudnim strujanjem ulja

ulje hladi i tako ohlađeno vraća u transformator (sl. 1.46). Ovakav način hlađenja je vrlo pouzdan, ali i skup zbog primjene dopunskih uređaja sa pumpom u sistemu za hlađenje.

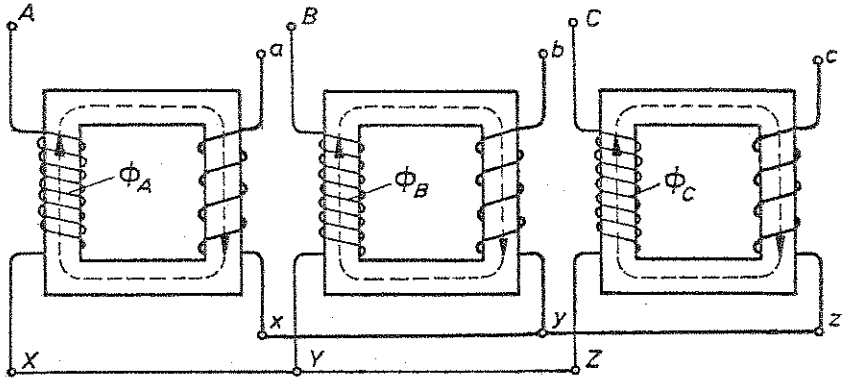
PITANJA ZA PROVJERU

1. Koji dijelovi transformatora aktivno učestvuju u transformaciji električne energije?
2. S obzirom na oblik magnetskog kola (željezne jezgre), kako smo izvršili podjelu transformatora?
3. Od čega je napravljena jezgra transformatora?
4. Koji oblik imaju transformatorski limovi i kako se vrši sastavljanje jezgre?
5. Koje oblike presjeka željezne jezgre imamo?
6. Gdje se smještaju ventilacioni kanali?
7. Koje vrste namotaja imamo?
8. Koje su prednosti, a koji nedostaci koncentričnih namotaja?
9. Koje su prednosti, a koji nedostaci naporedih namotaja?
10. Koji materijali se upotrebljavaju za jezgro, a koji za izradu namotaja?
11. Šta spada u pomoćne dijelove transformatora?
12. Kakvu ulogu ima konzervator?
13. Kakav značaj ima Buholcov relej i na kom principu radi?
14. Kakvu ulogu imaju provodni izolatori kod uljnih transformatora?
15. Zašto je potrebno hladiti transformator?
16. Opiši hlađenje transformatora prirodnim strujanjem vazduha ili ulja!
17. Opiši hlađenje transformatora prinudnim strujanjem vazduha ili ulja!

1.6. TROFAZNI TRANSFORMATORI

1.6.1. Trofazna transformacija

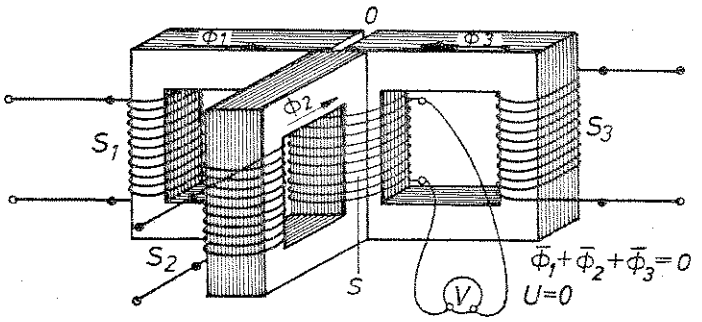
Do sada smo uglavnom govorili o jednofaznom transformatoru, koji je transformisao jedan napon i jednu struju. Kod trofaznih sistema potrebno je da transformišemo tri napona i tri struje. Najjednostavniji način ostvarivanja trofazne transformacije je da u svaku fazu trofaznog sistema stavimo po jedan jednofazni transformator i njihove namotaje spojimo u zvijezdu, kako je predstavljeno na sl. 1.47. Ovakav



Sl. 1.47. Izvedba trofaznog transformatora pomoću tri jednofazna transformatora („američka transformacija")

način trofazne transformacije najčešće se primjenjuje u Americi, pa ga često nazivamo „američka transformacija". Kako se sa slike vidi, svaka faza ima magnetski tok nezavisan od magnetskih tokova druge dvije faze, pa cjelokupan magnetski sistem trofazne transformacije nazivamo nezavisni magnetski sistem.

Ako tri jednofazna transformatora čiji je po jedan stub vezan u jedan zajednički postavimo kao na sl. 1.48, dobićemo simetrična trofazna jezgra. Pošto namo-

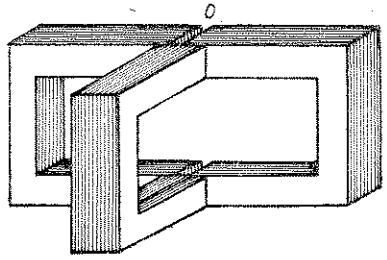


Sl. 1.48. Simetrična trofazna jezgra

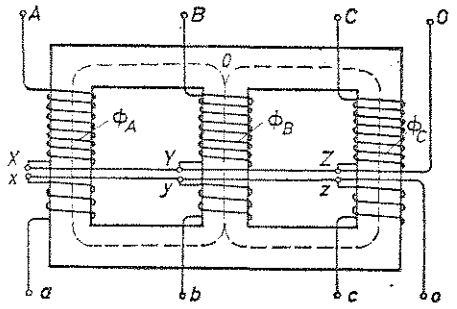
taji postavljeni na stubove S_1, S_2 i S_3 imaju jednak broj navoja, struje koje teku namotajima biće jednake, a prema tome i njihovi magnetski tokovi. Pošto magnetski tokovi čine simetričan sistem (fazno pomaknuti za 120°), izlazi da je zbir triju magnetskih tokova u svakom momentu jednak nuli, tj.

$$\Phi_1+\Phi_2+\Phi_3=0$$

Pošto u zajedničkom stubu S nema magnetskog toka, odnosno jednak je nuli, onda taj stub možemo izbaciti, kako je prikazano na sl. 1.49. Na taj način dobili smo jezgru trofaznog transformatora samo sa tri stuba, koju nazivamo simetrična jezgra. Odstojanje od stubova do tačke 0 je za sva tri kraka isto, a tačku 0 zovemo zvjezdište ili nul-tačka. Pošto bi simetričnu jezgru sa sl. 1.49. teško bilo



Sl. 1.49. Simetrična trofazna jezgra bez srednjeg stuba



Sl. 1.50. Evropski način izvedbe trofaznog transformatora („evropska trofazna transformacija")

u praksi izvesti, došlo se na ideju da se sva tri stuba smjeste u jednu ravninu (sl. 1.50). Kako se sa slike vidi, na takvu jezgru smješteni su namotaji i takav način transformacije nazivamo „evropska trofazna transformacija". Kod evropske izvedbe jezgra trofaznog transformatora nije simetrična zbog toga što magnetski tokovi do zvjezdišta nemaju istu dužinu puta, pa će i za njihovo stvaranje biti potrebne različite vrijednosti struja magnetiziranja. Uspoređujući sa američkom transformacijom, kod evropskog sistema transformacije magnetski tokovi nisu nezavisni. Oni, kako se sa sl. 1.50. vidi, prolaze zajedničkim magnetskim kolom, pa takav sistem nazivamo zavisni magnetski sistem.

Danas se u svijetu upotrebljavaju oba načina transformacije. I jedan i drugi imaju svoje prednosti, a i nedostatke. Spomenimo neke od njih. Američki način transformacije je skuplji, ali prednost mu je u tome što ako se jedan transformator pokvari, ostala dva nesmetano rade. To je zbog toga što svaki transformator radi potpuno samostalno, jer je njegova primarna strana spojena na jedan od vanjskih neutralnih provodnika. To isto važi i za sekundar. Također, svaki jednofazni transformator grupe (tzv. „faza") manjih je dimenzija i transportne mase od trostubnog transformatora za punu snagu grupe, što je veoma važno pri montaži i transportu. Za grupu jednofaznih transformatora za rezervu je dovoljan samo jedan transformator (jedna faza), a to je trećina snage grupe.

Prednost evropskog načina transformacije je u tome što su svi namotaji na jednoj željeznoj jezgri, pa je utrošak željeza znatno manji od američkog načina transformacije. Nedostatak, pak, predstavlja teže manipulisanje trofaznim transformatorom, a i vrlo je skupo držati ga u rezervi. Ako uspoređujemo po snazi, onda američki način transformacije ima stanovitu prednost kod vrlo velikih snaga gdje su sigurnost u radu i uslovi transporta veoma važni. Transformatori srednje i male snage izvodimo gotovo uvijek kao trostubne.

1.6.2. **Način spajanja i označavanja namotaja trofaznih transformatora**

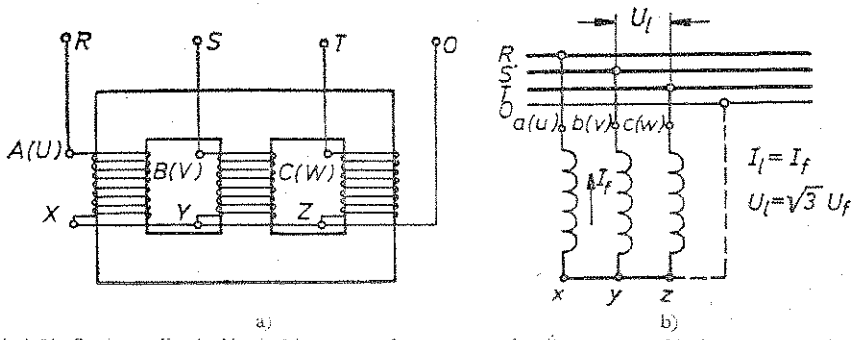
Kod trofaznih transformatora namotaje primara i sekundara možemo spojiti na tri načina: u zvijezdu, u trougao i u zvijezdu cik-cak (slomljena zvijezda). Oznaka za spoj u zvijezdu je veliko slovo *Y* za namotaj višeg napona, a malo *y* za namotaj nižeg napona. Za spoj trougao oznaka je veliko slovo *D* za namotaj višeg napona, a malo *d* za namotaj nižeg napona. Spoj zvijezda cik-cak, kako ćemo poslije vidjeti, upotrebljava se samo za spajanje namotaja nižeg napona, pa ima samo oznaku malo slovo *z*.

Trofazni transformatori imaju po tri namotaja (faze) višeg i po tri namotaja (faze) nižeg napona. Svaki namotaj ima dva izvoda, svoj početak i završetak. Počeci namotaja označavaju se početnim, a završeci završnim slovima abecede. Tako se početak namotaja višeg napona označava velikim slovima *A*, *B*, *C* (stare oznake *U*, *V*, *W*), a završetak sa *X*, *Y*, *Z*. Namotaji nižeg napona imaju iste oznake, samo se upotrebljavaju mala slova, tj. početak označavamo sa *a*, *b*, c (stare oznake *u*, *v*, *w*), a završetak sa *x*, *y*, *z*.

Izvod nulte tačke ili zvjezdišta transformatora označavamo sa 0 i 0 ili *N* i *n*.

Kod trofaznih transformatora izvode se samo počeci namotaja višeg i nižeg napona, dok se završeci spoje unutar transformatora u jedan od već poznatih spojeva.

Spoj u zvijezdu Y. Na sl. 1.51. predstavljen je spoj u zvijezdu: a) skicom sa oznakama namotaja višeg napona i b) shematski sa oznakama namotaja nižeg napona. Kako se sa slike vidi, završeci faznih namotaja spojeni su u jednu tačku koju nazivamo nul-tačka ili zvjezdište, dok su počeci namotaja spojeni na vanjsku električnu mrežu.



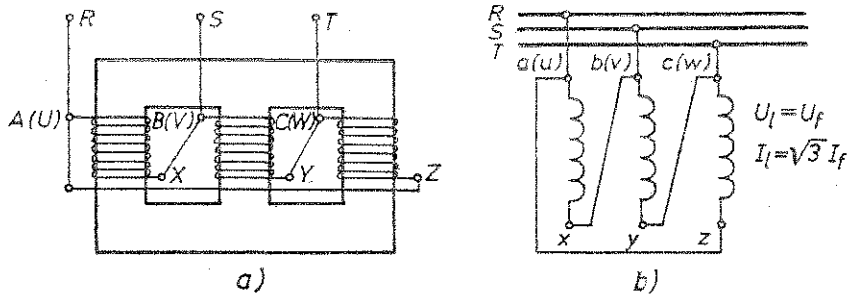
Sl. 1.51. Spoj u zvijezdu Y: a) skica sa oznakama namotaja višeg napona, b) shema sa oznakama namotaja nižeg napona.

Kod trofaznih sistema razlikujemo fazne i linijske (međufazne) napone i struje. To isto vrijedi kod spoja u zvijezdu ako iz zvjezdišta izvučemo nulti vod. Odranije je poznato da su u ovom spoju linijski naponi veći od faznih za $\sqrt{3}$ puta, a da su linijske i fazne struje jednake, tj.

$$U_l = \sqrt{3}\, U_f; \qquad I_l = I_f \qquad \ldots\ldots\ (1.70)$$

Spoj u trougao *D*. Na sl. 1.52. predstavljen je spoj u trougao: a) skicom sa oznakama namotaja višeg napona i b) shematski sa oznakama namotaja nižeg napona.

Kako se sa slike vidi, sva tri namotaja su međusobno spojena serijski, dok su kao i kod spoja zvijezda počeci namotaja spojeni na vanjsku električnu mrežu.

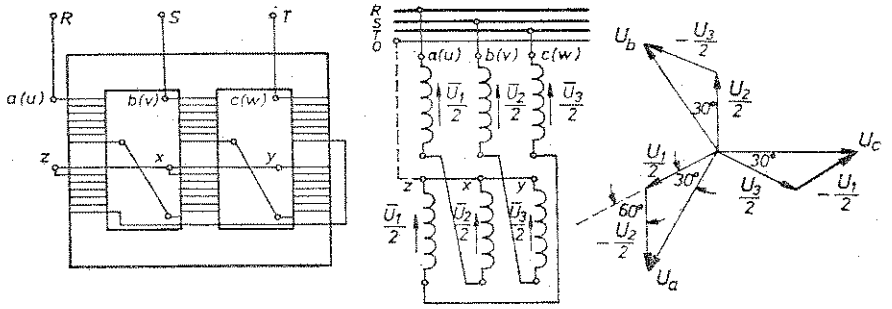


Sl. 1.52. Spoj u trougao *D*: a) skica sa oznakama namotaja višeg napona, b) shema sa oznakama namotaja nižeg napona.

Kod ovog spoja linijski naponi jednaki su faznim, dok su linijske struje veće od faznih za $\sqrt{3}$ puta, tj.

$$U_l = U_f; \quad I_l = \sqrt{3} I_f \qquad \ldots\ldots (1.71)$$

Spoj u zvijezdu cik-cak z. Na sl. 1.53. predstavljen je spoj u zvijezdu cik-cak: a) skicom i b) shematski sa oznakama namotaja nižeg napona. Kako se također sa slike vidi, svaki namotaj podijeljen je na dva jednaka dijela, od kojih je jedan na jednom, a drugi na drugom stubu željezne jezgre. Od šest polovičnih namotaja jedan pripada jednom, a drugi drugom namotaju (fazi).



a) b)

Sl. 1.53. Spoj u zvijezdu cik-cak z. a) Skica i shema sa oznakama namotaja nižeg napona, b) dijagram indukovanih napona.

Kod ovog spoja fazni napon dobićemo vektorskom razlikom polovičnih napona na dva različita stuba. Na sl. 1.53b. prikazan je dijagram indukovanih napona zvijezde cik-cak i na osnovu njega možemo pisati:

$$\overline{U}_a = \frac{\overline{U}_1}{2} - \frac{\overline{U}_2}{2}$$

$$\overline{U}_b = \frac{\overline{U}_2}{2} - \frac{\overline{U}_3}{2}$$

$$\overline{U}_c = \frac{\overline{U}_3}{2} - \frac{\overline{U}_1}{2}$$

Iz vektorskog dijagrama proizlazi:

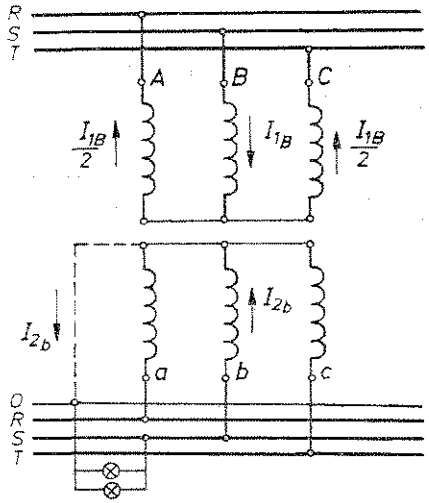
$$U_{fz} = 2\frac{U_{fy}}{2}\cos 30° = U_{fy}\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad \ldots\ldots (1.72)$$

Ako želimo imati isti napon u spoju zvijezda cik-cak kao u spoju zvijezda, broj navoja moramo povećati za $2/\sqrt{3}$ puta. To znači, ukupna masa bakra povećava se za oko 16%. Iako je ovakav spoj skuplji, ipak ga upotrebljavamo za spoj namotaja nižeg napona, jer može da podnese velika nesimetrična opterećenja.

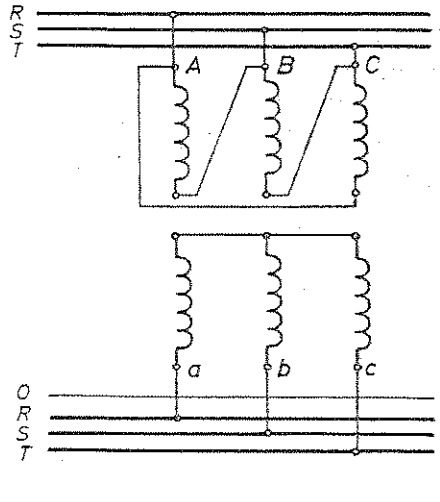
1.6.3. **Grupe spajanja namotaja trofaznih transformatora**

Kako smo vidjeli, namotaji trofaznih transformatora mogu se spojiti na tri načina. Svaki od ovih spojeva može se primijeniti i kod namotaja višeg kao i kod namotaja nižeg napona, pa se tako javlja više kombinacija. Ako se uzme u obzir da se spoj zvijezda cik-cak javlja samo na sekundarnoj strani i da se svaka kombinacija pojavljuje uvijek dva puta, praktično je moguće ostvariti šest kombinacija. To su: *Yy*, *Dd*, *Dy*, *Yd*, *Yz*, *Dz*. Ove kombinacije zovemo grupe (sprege) spajanja. Najčešće upotrebljavane grupe su: zvijezda-zvijezda *Yy*, trougao-zvijezda *Dy* i zvijezda-zvijezda cik-cak *Yz*.

Spoj zvijezda — zvijezda. Na sl. 1.54. predstavljen je spoj zvijezda-zvijezda, koji ima sljedeće prednosti:



Sl. 1.54. Spoj zvijezda-zvijezda *Yy*



Sl. 1.55. Spoj trougao-zvijezda *Dy*

— sa strane višeg napona postoji nulta tačka, koja se direktno ili preko aktivnog ili induktivnog otpora može spojiti sa zemljom radi obezbjeđenja;

— sa strane nižeg napona može se izvesti nulti provodnik (može se spojiti sa zemljom), pa tako možemo koristiti dva napona, fazni i linijski.

Slabe strane ovog spoja su:

— ako je samo jedna faza opterećena, na ostalim fazama javlja se napon veći od nominalnog, uslijed čega stradaju trošila priključena na te faze. Npr. ako opteretimo samo srednju fazu, onda će struja te faze I_{2b} preko nultog voda i trošila zatvoriti električno kolo. Kako smo već odranije naučili, veća struja sekundara izazvaće istu toliku struju u primarnom namotaju (u istoj fazi). Ta struja srednje faze primara I_{1B} u čvorištu se grana na ostale dvije faze i u njima će teći polovične struje $I_{1B}/2$ u negativnom smjeru. Ove struje stvaraju svoje magnetske tokove

koji indukuju u svojim fazama (a to su faza A i faza C) veće napone od nominalnih, uslijed čega stradaju trošila priključena na te faze;

— promjenljivost (neravnomjernost) opterećenja na sekundaru prenosi se i na primar, a preko električnog voda i na generator u elektrani.

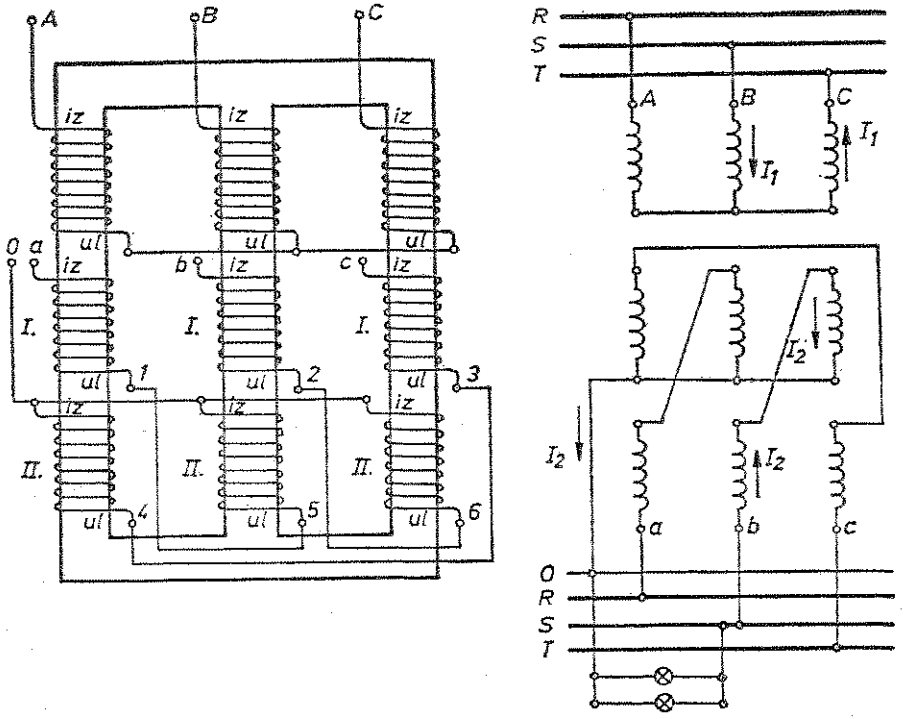
Spoj trougao — zvijezda. Kod ovog spoja (sl. 1.55) promjenljiva opterećenja sekundarnih faza ne prenose se na primar, jer se u njegovim namotajima spojenim u trougao pojavljuju lokalne struje.

Nedostatak ovog spoja je u tome što na strani višeg napona nema nulte tačke. Ukoliko bismo je zbog obezbjeđenja htjeli imati, morali bismo je izvesti na vještački način pomoću otpora.

Spoj zvijezda — zvijezda cik-cak. Ovim spojem, koji je predstavljen na sl. 1.56, eliminišemo slabe strane naprijed navedenih spojeva, a zadržavamo njihove prednosti.

Ako izvršimo poređenja osobina transformatora u spoju zvijezda cik-cak sa transformatorom u spoju zvijezda, dolazimo do slijedećih zaključaka:

— kod transformatora u spoju zvijezda-zvijezda cik-cak sekundar će imati za 15,5% veći broj navoja nego u slučaju zvijezde;



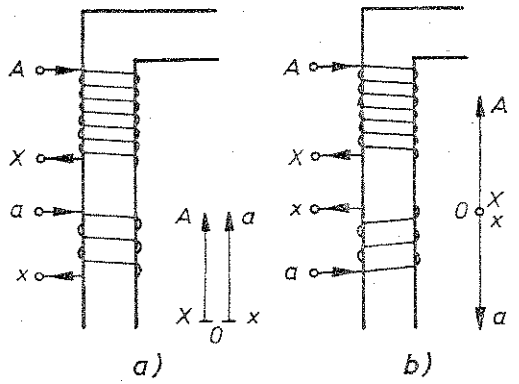
Sl. 1.56. Spoj zvijezda-zvijezda cik-cak Yz

— džulova toplota i aktivni pad napona u sekundaru su povećani za 15,5%;

— masa bakra potrebnog za izradu sekundara povećava se za 15,5%.

Kako se iz ovih iskustvenih podataka vidi, transformator u ovom spoju je skuplji, a i gubici su nešto veći. Međutim, vrlo je pogodan za mreže sa rasvjetnim trošilima, gdje su faze nejednako opterećene. Tako ako je opterećena samo jedna faza sekundara npr. srednja, struja I_2 teče kroz polunamotaje obje faze smještene na srednjem i desnom stubu magnetskog kola, što u primaru izaziva odgovarajuće struje u srednjem i desnom faznom namotaju. Pošto primarne struje potpuno poništavaju magnetsko djelovanje sekundarne struje, i u ovom spoju ne postoji opasnost od nastajanja dodatnog magnetskog toka a time i većeg napona od nominalnog.

Grupe spoja Yy, Dy i Yz, o kojima smo govorili, nisu određene samo spojem namotaja primarne i sekundarne strane. Naime, između faznih napona iste faze primarne i sekundarne strane može doći do faznog pomaka. Razlog tome je smisao namatanja i način spajanja namotaja primara i sekundara. Ako je npr.



Sl. 1.57. Dijagrami vektora napona u zavisnosti od smisla (smjera) namatanja namotaja a) isti smisao namatanja, fazni pomak ne postoji, b) suprotan smisao namatanja, naponi u protufazi

isti smisao namatanja faznog namotaja primara i sekundara, fazni pomak ne postoji, odnosno jednak je nula stepeni. Međutim, ukoliko je sekundar namotan suprotno (ima drugi smisao namatanja), onda fazni ugao iznosi 180° (sl. 1.57).

Proizvoljno ćemo odrediti da je gornji namotaj transformatora na stubu primarni namotaj, a donji sekundar. Isto to ćemo uraditi sa početcima i završecima namotaja. Sasvim je sporedno koju ćemo stranu namotaja odrediti za početak, a koju za završetak. No važno je da se tog određenja držimo. U našem slučaju gornje stezaljke namotaja smo uzeli za početak i označene su slovima A i a, a donje stezaljke X i x su određene za završetak namotaja.

Sa sl. 1.57a. vidimo da oba namotaja (primar i sekundar) imaju isti smisao (smjer) namatanja. Pošto su oba namotaja smještena na isti stub i obuhvaćena su istim magnetskim tokom, u našem slučaju indukovani naponi u namotajima imaju u svakom momentu isti smisao u odnosu na stezaljke namotaja, npr. od početka A prema završetku X u primarnom i od početka a prema završetku x u sekundar-

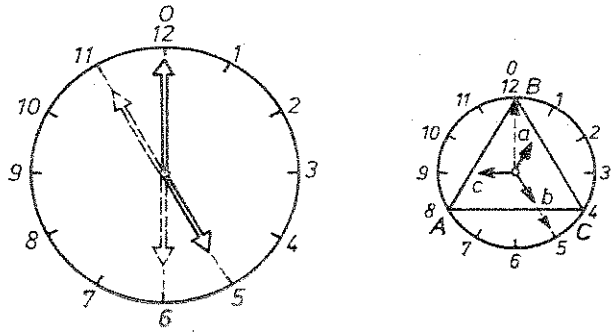
nom namotaju. U skladu s time, naponi U_1 i U_2 na stezaljkama primarnog i sekundarnog namotaja transformatora podudaraju se u fazi i predstavljeni su sa dva vektora OA i Oa, čiji je smjer isti.

Ako namotaji primara i sekundara imaju suprotan smisao (smjer) namatanja (moraju zadržati iste oznake!), onda su, kako se vidi sa sl. 1.57b, indukovani naponi u odnosu na stezaljke primarnog i sekundarnog namotaja suprotni, npr. u primarnom namotaju od A prema X, a u sekundarnom namotaju od x prema a. Znači, naponi U_1 i U_2 predstavljeni vektorima $\overline{OA}$ i $\overline{Oa}$ imaju suprotan smjer.

Kako se sa slike 1.53b. vidi, ako se radi o vezivanju polunamotaja u spoju zvijezda cik-cak, fazni pomak između npr. faznog napona U_1 i faznog napona U_2 sa promijenjenim smjerom iznosi 60°.

Kako ćemo to vidjeti kasnije, za paralelan rad transformatora, pored grupe spoja, važan je i ugaoni broj koji pokazuje koliko geometrijskih stepeni iznosi fazni pomak. Izražavanje faznog pomaka geometrijskim stepenima nije praktično, pa je usvojen internacionalni sistem satne metode predstavljanja.

Odranije je poznato da su vektori napona u trofaznom sistemu međusobno pomaknuti za 1/3 periode, odnosno za 120°, ili, pak, možemo kazati da je među njima pomak za četiri (4) satna broja. Na satnom brojčaniku 12 sati odgovara 360°, pa tako 360°:12=30° odgovara jednom satnom broju. Da zaključimo: satni ugao je fazni pomak između vektora primarnog i sekundarnog napona iste faze npr. A i a izražen u satnim brojevima od 0 do 12. Pri tome, kako smo već ustanovili, jednom satnom broju odgovara ugao od 30°. Ovaj satni sistem predstavljen je na sl. 1.58. Postavimo li veliku kazaljku na broj 12, što ujedno znači nulti polo-



Sl. 1.58. Satni sistem predstavljanja grupa spajanja trofaznih transformatora

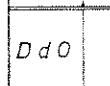
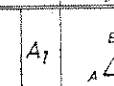
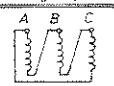
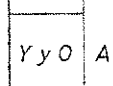
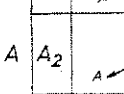
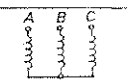
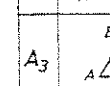
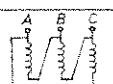
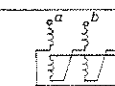
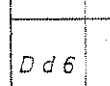
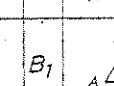
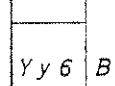
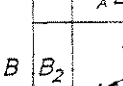
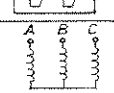
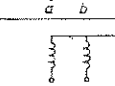
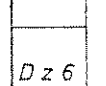
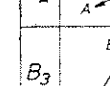
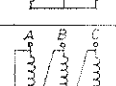
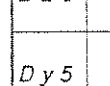
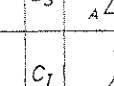
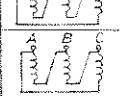
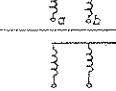
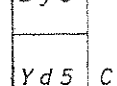
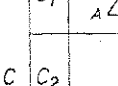
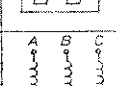
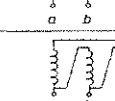
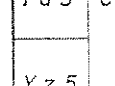
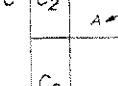
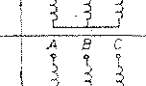
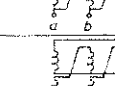
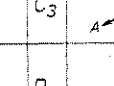
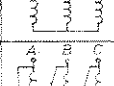
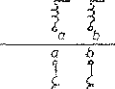
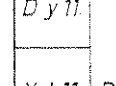
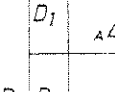
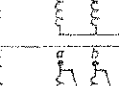
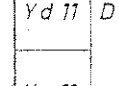
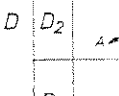
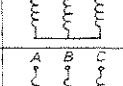
žaj, ona predstavlja vektor strane višeg napona, dok mala kazaljka pokazuje sate od 0 do 11 i predstavlja vektor faznog napona iste faze ali strane nižeg napona.

Pri određivanju satnog ugla moramo se pridržavati sljedećih pravila:

— izdvojiti vektore faznih napona iste faze (redovno faze B), i nacrtati ih tako da idu iz čvorišta ili iz sredine trougla prema saglasno određenim stezaljkama;

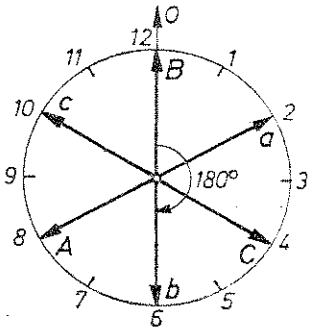
— satni ugao se mjeri između dva vektora i to od vektora koji pripada strani višeg napona do vektora koji pripada strani nižeg napona, i to u smjeru kretanja kazaljke na satu.

PREGLED GRUPA SPAJANJA TROFAZNIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

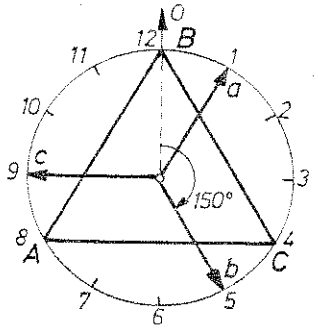
Oznaka grupe spoja prema IEC	Oznaka grupe spoja prema VDE		VEKTORSKI PRIKAZ: Strana višeg napona	VEKTORSKI PRIKAZ: Strana nižeg napona	FAZNI UGAO	SHEMATSKI PRIKAZ: Strana višeg napona	SHEMATSKI PRIKAZ: Strana nižeg napona
Dd0	A	A_1			0°		
Yy0	A	A_2			0°		
Dz0	A	A_3			0°		
Dd6	B	B_1			180°		
Yy6	B	B_2			180°		
Dz6	B	B_3			180°		
Dy5	C	C_1			150°		
Yd5	C	C_2			150°		
Yz5	C	C_3			150°		
Dy11	D	D_1			330°		
Yd11	D	D_2			330°		
Yz11	D	D_3			330°		

Sl. 1.59. Pregled oznaka pojedinih grupa spajanja sa njihovim shematskim predstavljanjem kao i vektorskim položajem napona

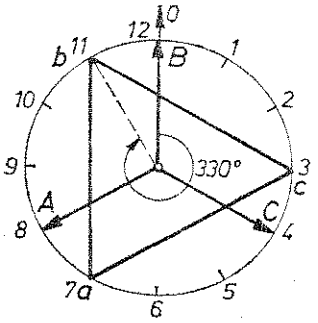
Svi spojevi kod kojih je strana nižeg napona pomaknuta za isti ugao prema strani višeg napona svrstavamo u jednu grupu. Tako dobijemo 11 grupa, ali se praktički primjenjuju grupe spoja s faznim pomacima 0, 6, 5 i 11. Na sl. 1.59. prikazan je pregled oznaka pojedinih grupa spoja po IEC i VDE propisima, njihovo shematsko predstavljanje kao i vektorski položaj napona.



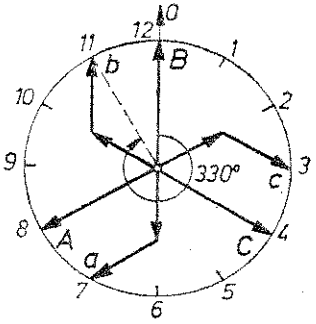
Sl. 1.60. Grupa spoja *Yy*6



Sl. 1.61. Grupa spoja *Dy*5



Sl. 1.62. Grupa spoja *Yd*11



Sl. 1.63. Grupa spoja *Yz*11

Da bi nam vektorska slika napona primarne i sekundarne strane bila jasnija (naročito fazni pomak), prikazaćemo nekoliko grupa spojeva gdje se vektori napona primarne i sekundarne strane nalaze na istom crtežu (sl. 1.60, 1.61, 1.62. i 1.63).

1.6.4. **Simetrično i nesimetrično opterećenje**

Transformator čiji je primar priključen na izvor električne energije (generator ili električna mreža visokog napona) sa sekundarne strane može biti opterećen raznim vrstama trošila kao što su: jednofazna i trofazna, velike i male snage, vremenski uključena neravnomjerno itd. Sva ta opterećenja svrstavamo u dvije grupe:

— simetrična opterećenja i
— nesimetrična opterećenja.

Simetrično opterećenje nastaje onda ako je svaka faza ravnomjerno opterećena, tj. na svaku fazu priključeno je trošilo koje je sa ostalima isto po veličini i faznom uglu. Naponi na stezaljkama su jednaki i simetrični (međusobno pomaknuti za 120°). Struje su također jednake i međusobno su pomaknute za 120°. Njihov zbir trenutnih vrijednosti jednak je nuli. Ovakvo opterećenje u praksi se rijetko pojavljuje.

Nesimetrično opterećenje nastaje kada su fazni namotaji neravnomjerno opterećeni, tj. kroz njih teku struje nejednake po veličini i faznom uglu. To uglavnom nastaje kada su na sekundarnu stranu transformatora priključena jednofazna niskonaponska trošila kao što su: sva trošila električne rasvjete, sva trošila seoskih i gradskih domaćinstava, jednofazni motori u poljoprivredi, zanatstvu itd. Zbir njihovih trenutnih vrijednosti nije jednak nuli, pa otuda izlazi da kroz nulti vod teče neka vrijednost struje.

Najnepovoljniji slučaj nesimetričnog opterećenja je kada je samo jedna faza opterećena. To smo već razmotrili kada smo govorili o spoju zvijezda-zvijezda *Yy*. Povoljno ponašanje spoja zvijezda-zvijezda cik-cak *Yz* pri nesimetričnom opterećenju, također, smo objasnili ranije.

Da zaključimo:

Za povezivanje mreža visokog napona upotrebljavaju se transformatori čiji su namotaji spojeni u grupe *Yy*0, *Dy*5 i *Yd*5. Oni su uglavnom simetrično opterećeni. Spoj *Yy*0 upotrebljavamo za vrlo visoke napone, a manje snage; spoj *Dy*5 upotrebljavamo za visoke napone i velike snage (250 do 1600 kVA); spoj *Yd*5 upotrebljava se kod transformatora u elektranama koji napajaju prenosnu električnu mrežu.

Kod nesimetričnog opterećenja upotrebljavamo ove grupe spoja *Yy*0, *Dy*5 i *Yz*5. Spoj *Yy*0 primjenjuje se kod transformatora za rasvjetu (imaju nulti vod i sa primarne i sa sekundarne strane); spoj *Dy*5 upotrebljava se samo za transformatore većih snaga (u tom slučaju je ekonomičan); spoj *Yz*5 upotrebljava se uspješno za sva nesimetrična opterećenja gdje je transformacija 10/0,4 kV.

1.6.5. **Paralelni rad transformatora**

Pri prenosu, raspodjeli i snabdijevanju električnom energijom, javlja se, bilo zbog ekonomičnijeg održavanja električne mreže, standardizovanih snaga transformatora bilo zbog neravnomjernog dnevnog opterećenja ili opterećenja iz nekih drugih razloga, potreba da za jednu mrežu rade dva ili više transformatora. Ovakav rad ima veoma velike prednosti. Npr. upotrebom većeg broja paralelno spojenih transformatora možemo pojedinačno manjim transformatorima prenositi tolike snage koje jednim većim ne bi bilo moguće. Nadalje, u slučaju potrebe manjeg opterećenja može se jedan broj transformatora otkopčati, pa to onda u izvjesnoj mjeri smanjuje gubitke električne energije. I na kraju, dođe li do kvara na jednom paralelno spojenom transformatoru, ostali nesmetano i dalje rade.

Iz ovog izlazi da pod paralelnim radom dva ili više transformatora podrazumijevamo slučaj kada su im krajevi primarnih namotaja spojeni za zajednički izvor električne energije, odnosno za zajedničku električnu mrežu (za iste sabirnice), a krajevi sekundara također spojeni na zajedničku mrežu, odnosno zajedničke

sabirnice. Znači, transformatori se napajaju sa primarne strane iz iste električne mreže i vrše zajedničku transformaciju za istu sekundarnu mrežu (sl. 1.64).

Za ispravan paralelni rad i dobru transformaciju jedne električne energije u drugu transformatori koji rade zajednički moraju ispunjavati određene uslove:

1. Nominalni naponi primara i sekundara svih transformatora moraju biti jednaki, tj.

$$U_{1T1}=U_{1T2}=\ldots U_{1Tn} \quad \ldots (1.73)$$

$$U_{2T1}=U_{2T2}=\ldots U_{2Tn} \quad \ldots (1.74)$$

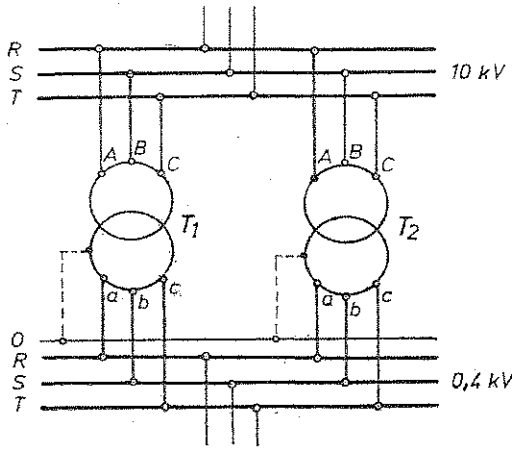
Navedeni uslov svodi se praktički na zahtjev jednakosti prenosnih odnosa svih transformatora, tj.

$$k_{T1}=k_{T2}=\ldots k_{Tn} \quad \ldots\ldots (1.75)$$

2. Aktivni i induktivni padovi napona svih transformatora moraju biti isti, pa prema tome i naponi kratkog spoja moraju biti jednaki, tj.

$$u_{kT1}=u_{kT2}=\ldots u_{kTn} \quad \ldots (1.76)$$

3. Svi trofazni transformatori u paralelnom radu moraju pripadati istoj grupi spoja.



Sl. 1.64. Spoj dva trofazna transformatora za paralelni rad

4. Isti redoslijed faza, tj. da na iste sabirnice budu međusobno spojene iste faze svih paralelno priključenih transformatora.

5. Nominalne snage moraju biti iste, a ukoliko to nije moguće, postići razliku da ne prelazi odnos 1:3.

Paralelno mogu raditi i jednofazni i trofazni transformatori. Svi uslovi za normalan paralelni rad su isti izuzev onog trećeg koji jednofazni transformatori nemaju.

Ukoliko prvi uslov nije ispunjen, tj. ako sekundarni naponi pri praznom hodu nisu jednaki, između paralelno spojenih transformatora pojaviće se lokalne struje. Koji je njihov uzrok nastanka?

Pretpostavimo da je $k_{T1}<k_{T2}$. Pošto su namotaji oba transformatora priključeni na jedne sabirnice, biće $U_{1T1}=U_{1T2}$. Međutim, pošto nam prenosni odnos pokazuje da je na sekundaru transformatora T_1 veći broj navoja, to izlazi da će on imati i veći indukovani napon, tj. $E_{2T1}>E_{2T2}$. Zaključujemo da je došlo do pojave razlike indukovanih napona oba transformatora

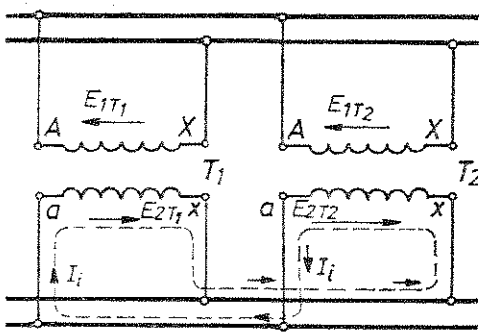
$$\Delta E=E_{2T1}-E_{2T2} \quad \ldots\ldots (1.77)$$

uslijed čega u zatvorenom električnom kolu sekundarnih strana transformatora nastaje struja. Nju nazivamo strujom izjednačenja čije je proticanje pokazano na sl. 1.65.

Sa slike se jasno vidi da su oba transformatora u pogledu napona ΔE kratko spojena i zanemarujući aktivne otpore kratkog spoja, dobivamo formulu za izračunavanje vrijednosti struje izjednačenja

$$I_j=\frac{\Delta E}{X_{kT1}+X_{kT2}} \quad \ldots\ldots (1.78)$$

Struja izjednačenja u transformatoru T_1 koji ima veći napon zaostaje iza napona E_{2T1} za 90°, dok prethodi naponu E_{2T2} za isti ugao. Iako se radi o istoj struji, ona različito djeluje na transformatore (u odnosu na transformator T_1 je induktivna, a na transformator T_2 kapacitivna). Struje izjednačenja I_{iT1} i I_{iT2} izazivaju padove napona na transformatorima $I_{iT1}X_{kT1}$ i $I_{iT2}X_{kT2}$ koji prednjače za odgovarajućim strujama za 90°. Pad napona $I_{iT1}X_{kT1}$ ima suprotan smjer naponu E_{2T1} i nastoji ga smanjiti, dok pad napona $I_{iT2}X_{kT2}$ ima isti smjer sa naponom E_{2T2} i nastoji ga povećati. Na osnovu iznesenog, naponi na sekundarnim sabirnicama svakog transformatora određeni su relacijama:

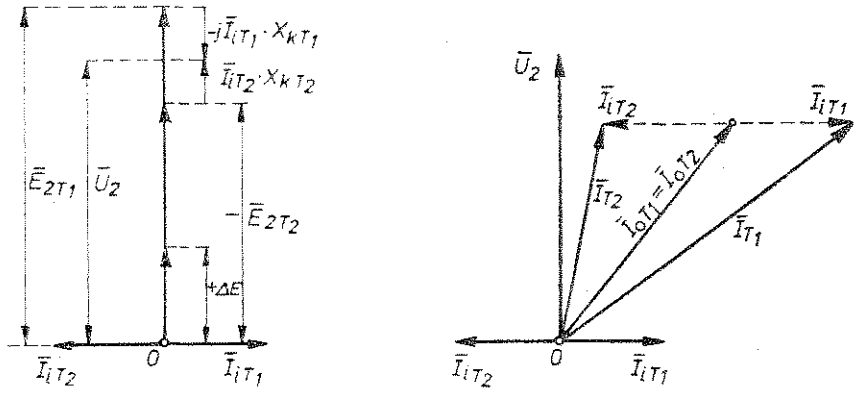


Sl. 1.65. Struje izjednačenja kod paralelnog rada transformatora pri nejednakim odnosima transformacije

$$\overline{U}_2=\overline{E}_{2T1}-j\overline{I}_{2T1}\,\overline{X}_{kT1} \quad \text{(za transformator } T_1) \quad \ldots\ldots (1.79)$$

$$\overline{U}_2=\overline{E}_{2T2}-j\overline{I}_{2T2}\,\overline{X}_{kT2} \quad \text{(za transformator } T_2) \quad \ldots\ldots (1.80)$$

na osnovu kojih crtamo vektorski dijagram paralelnog rada transformatora u praznom hodu kada koeficijenti transformacije nisu isti (sl. 1.66a).



Sl. 1.66. Vektorski dijagram paralelnog rada transformatora pri nejednakim odnosima transformacije: a) u praznom hodu, b) pri opterećenju.

Pri opterećenju naponi E_{2T1} i E_{2T2} se praktično mijenjaju podjednako; prema tome razlika $\Delta E = E_{2T1} - E_{2T2}$ i struja izjednačenja I_i ostaju gotovo isti kao u praznom hodu. Pošto je struja izjednačenja, kako smo vidjeli, izjednačila sekundarne napone transformatora, struja opterećenja će se raspodijeliti ravnomjerno između oba transformatora, tj. $I_{0T1} = I_{0T2}$.

Ako geometrijski saberemo te struje sa strujama I_{1T1} i I_{1T2} (sl. 1.66b) dobićemo rezultantne struje I_{T1} i I_{T2}. Prva struja veća je od I_{0T1}, a druga manja od I_{0T2}. Prema tome, ako je transformator T_1 potpuno opterećen, transformator T_2 biće nedovoljno opterećen: obrnuto, pri punom opterećenju drugog transformatora prvi je preopterećen. Normalnim se smatra prvi slučaj, jer je preopterećenje u pravilu nedozvoljeno. Na taj način pri nejednakom odnosu transformacije struja izjednačenja ne dozvoljava da se potpuno opterete svi paralelno spojeni transformatori.

Ako se odnos transformacije znatno razlikuje, struja izjednačenja I_i ne samo što predstavlja čist gubitak električne energije nego može postati toliko velika da onemogućava normalan rad transformatora. Zato je propisima određeno da razlika u prenosnim odnosima transformacije ne prelazi 0,5%.

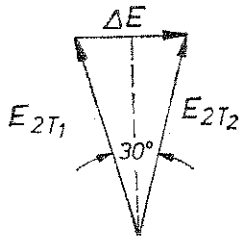
Ukoliko drugi uslov nije ispunjen, tj. naponi kratkog spoja nisu isti, raspodjela opterećenja na transformatorima izvršiće se srazmjerno svojim nominalnim snagama, a obrnuto srazmjerno njihovim naponima kratkog spoja. To znači, transformator s manjim naponom kratkog spoja preuzima na sebe veći teret od drugog. U slučaju da je teret jednak zbiru njihovih nominalnih snaga, transformator čiji je napon kratkog spoja manji bio bi preopterećen, a drugi podopterećen. Ukoliko bi nazivne snage transformatora u paralelnom radu bile nejednake, razlika u opterećenju bila bi još veća. Zato propisi zahtijevaju da naponi kratkog spoja transformatora koji rade paralelno ne prelaze granicu od 10% nominalnog napona kratkog spoja.

Treći uslov bez tolerancije mora biti ispunjen, tj. trofazni transformatori za normalan paralelni rad moraju pripadati istoj grupi spoja.

Ako ipak ovaj uslov nije ispunjen (prva dva ispunjena), tj. trofazni transformatori pripadaju različitim grupama spajanja (npr. grupa 5 i grupa 6), u tom slučaju sekundarni naponi iste faze obadva transformatora biće međusobno pomaknuti za 30°, što daje nedopustivo velike razlike napona već u praznom hodu:

$$\frac{\Delta E}{2} = E \sin 15°$$

$$\Delta E = 2E \sin 15° = 0{,}528\, E \qquad \ldots\ldots (1.81)$$



Sl. 1.67. Pomak sekundarnih napona kada transformatori pripadaju različitim grupama spajanja (npr. grupa 5 i grupa 6)

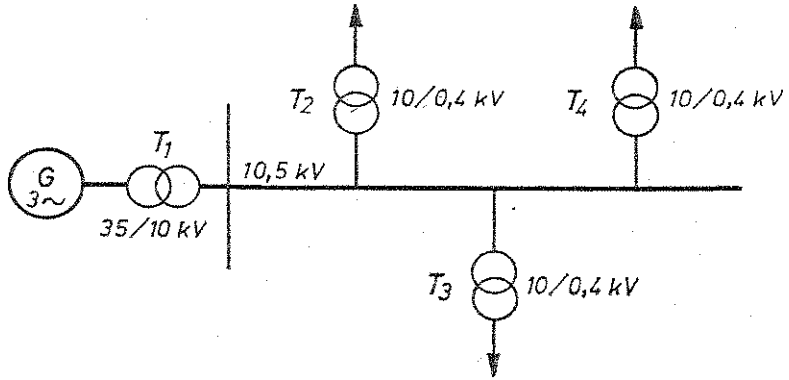
Ovaj znatan napon ΔE koji se pojavljuje u kolu transformatora reda veličine faznih napona namotaja (sl. 1.67) izaziva struju izjednačenja koja nekoliko puta premašuje vrijednost nominalne struje, jer su impedance Z_{kT1} i Z_{kT2} u kolu struje izjednačenja malene. Dakle:

$$I_i = \frac{\Delta E}{Z_{kT1} + Z_{kT2}} \qquad \ldots\ldots (1.82)$$

One su ograničene samo padovima napona pa bi transformatori već u praznom hodu bili nedopustivo preopterećeni.

1.6.6. **Regulacija napona transformatora**

Kod prenosa električne energije u prenosnim mrežama i mrežama gdje se vrši raspodjela nastaju padovi napona. Oni dovode do toga da transformator na primarnoj strani ne dobiva nominalni napon. Koliko manji napon će dobiti transformator zavisi na kom mjestu duž električnog voda se nalazi. Na sl. 1.68. predstavljen je raspored transformatora priključenih na električni vod.



Sl. 1.68. Raspored transformatora priključenih duž električnog voda

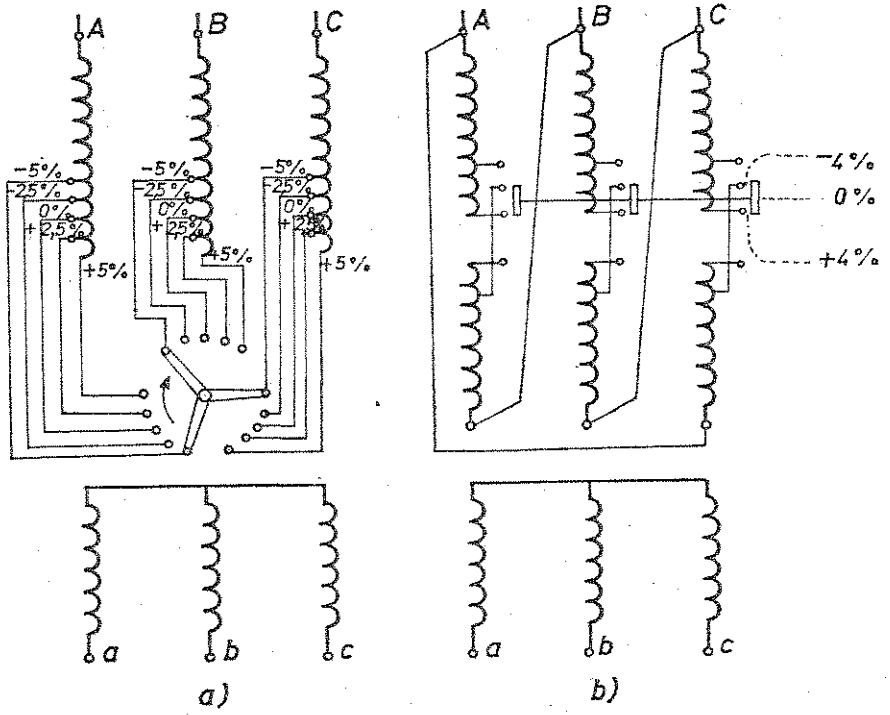
Nije teško zaključiti da će zbog pada napona u vodu najniži napon biti na krajevima transformatora T_4 koji je najudaljeniji od izvora električne energije, a najviši kod transformatora T_1 koji se nalazi uz generator. Iz ovog proizlazi da će i sekundarni naponi biti različiti, a to nije dobro za trošila.

Da bi vrijednost napona na krajevima sekundara svih transformatora dužinom voda održavali stalnim, potrebno je napon regulisati. To vršimo promjenom odnosa transformacije. Odranije poznata relacija $U_2 = U_1 N_2/N_1$ pokazuje nam da sekundarni napon možemo regulisati promjenom broja primarnih ili sekundarnih navoja. Redovito to vršimo mijenjanjem broja navoja primarnog namotaja, odnosno namotaja višeg napona, jer se radi o manjim strujama, pa je povoljnije i sa stanovišta kontakata, te se transformator pri gradnji snabdijeva sa 5% većim brojem navoja nego što je potrebno za ostvarenje nominalnog napona. To postižemo pomoću izvoda (odcjepa). Na sl. 1.69a. shematski je prikazan prebacivač (preklopka) sa izvodima trofaznog transformatora. Izvodi se rade kod −5%, −2,5% i konačno 5% ukupnog broja navoja. Ako je primarni namotaj spojen u zvijezdu, kako je prikazano, izvodi se uzimaju od navoja koji su blizu nulte tačke (zvjezdišta). To radimo zato da izbjegnemo visoki napon na preklopki. Ukoliko je primar spojen u trougao, izvodi se uzimaju od navoja koji se nalaze na sredini namotaja (sl. 1.69b).

Za primjer sa sl. 1.68. kod transformatora T_1 koji se nalazi u elektrani prebacivač treba da bude u položaju +5%, tako da je broj navoja za 5% veći od nominalnog,

jer je na mjestu gdje se nalazi transformator T_1 napon viši od nominalnog. Kod transformatora T_4, kod koga je napon manji od nominalnog, prebacivač treba staviti u položaj -5%, tako da primar ima za 5% manji broj navoja (ove konstatacije provjeri na osnovu formule $U_2 = U_1 N_2/N_1$!).

Da zaključimo: svakim povećanjem broja primarnih navoja smanjuje se napon na sekundarnom namotaju i obratno, smanjenjem broja navoja primara povećava se sekundarni napon.



Sl. 1.69. Izvodi (otcjepi) za (4 do 5%) napona i spoj preklopke: a) u spoju zvijezda, b) u spoju trougao.

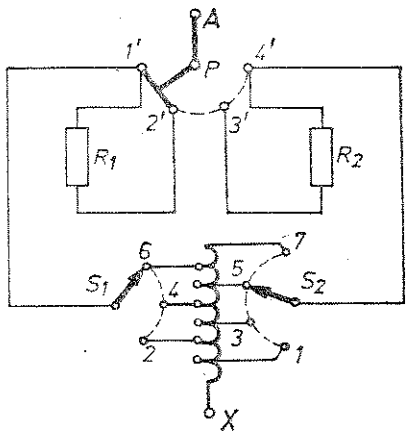
Na poklopcu transformatora nalazi se ručica prebacivača kojom vršimo upravljanje. Označeni su i položaji prebacivača koji predstavljaju pripadajuće naponsko stanje, ti. od $+5\%$ do -5%.

Treba zapamtiti da se prebacivanje iz jednog položaja u drugi vrši samo kada je transformator isključen sa električne mreže, kako se to popularno naziva u „beznaponskom stanju".

Da bi se u mrežama visokog napona održavala stalna naponska stanja, kod transformatora mora postojati mogućnost promjene njihovog sekundarnog napona. Za vrijeme regulacije napona transformatore ne isključujemo iz pogona (raznovrsna

trošila velikog područja bi ostala bez električne energije). Zapravo regulacija se vrši pod opterećenjem. U momentu preklapanja pod opterećenjem jedan dio namotaja za kratko vrijeme bio bi u kratkom spoju. Na taj način, nastale struje kratkog spoja treba ograničiti. Zato nam služi naprava čija shema je predstavljena na sl. 1.70.

Naprava se sastoji od dvije sklopke S_1 i S_2 koje su spojene sa krajevima namotaja i jednog prebacivača (preklopke) P. Ograničenje struje pri prelaženju kliznog kontakta prebacivača preko kontakata 1′2′3′ i 4′ vrši se uključenjem zaštitnih otpornika R_1 i R_2. Na slici je predstavljen principijelan spoj ove regulacije i to za položaj u kome struja teče preko lijevog kliznog kontakta 1′ 2′. U tom položaju ukopčani su u sva tri fazna namotaja oni navoji koji trenutno pripadaju području $X-6$. Ako hoćemo preći na slijedeći stepen pomoću koga dobivamo manje navoja (u našem slučaju na kontakt 5), pomičemo prebacivač P udesno. U jednom momentu kada prebacivač dođe u položaj 2′ 3′, spojiće oba otpornika R_1 i R_2 kojima će teći struja čija je vrijednost tolika da neće štetno djelovati na transformator. Pomicanjem još više udesno prebacivač P dolazi u položaj u kome struja teče samo otpornikom i konačno, dolazi u položaj 3′ 4′ u kojem će prebacivač P premostiti otpornik R_2, pa će struja teći samo provodnikom.



Sl. 1.70. Shematski prikaz naprave za regulaciju napona pri opterećenju

Ukoliko je potrebno vršiti daljnje prebacivanje, postavljamo sklopku S_1 na kontakt 4. Postupak ponavljamo kao i prije, s tom razlikom što prebacivač P pomičemo ulijevo.

Svi ovi pokreti prebacivača i sklopki izvode se pomoću mehaničke naprave u veoma kratkim vremenskim intervalima u stotinkama sekunde (oko 1/25 s). Nalazi se na kotlu transformatora i njome se može upravljati ručno ili sa daljine pomoću servomotora.

Osim ove naprave, za regulisanje napona transformatora pri opterećenju u posljednje vrijeme sve češće se upotrebljava sklopka s prigušnicom. Zadatak prigušnice je da u određenom momentu, kada je jedan dio namotaja u kratkom spoju, izvrši prigušenje struje kratkog spoja. Ovom napravom napon se reguliše u rasponu od -20 do $+20\%$ nominalnog napona.

Na kraju da kažemo da se regulisanje napona transformatora može vršiti i prespajanjem namotaja. To se izvodi:

— promjenom spoja namotaja i

— dijeljenjem namotaja.

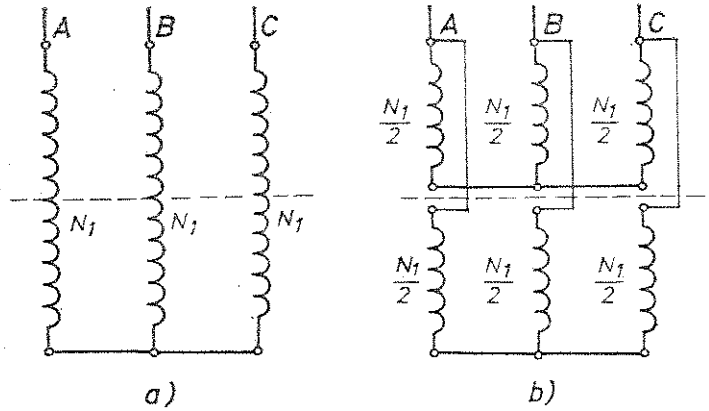
Do sada smo naučili da se namotaji primarne strane transformatora mogu spojiti u zvijezdu ili trougao. Znači da transformator može da radi na dva primarna napona koji se međusobno razlikuju za $\sqrt{3}$ puta, a da pri tome napon sekundara

ostane isti. Npr. ako je primar transformatora spojen u trougao i graden za napon od 6 kV, isti taj primar kad ga prespojimo u spoj zvijezda, možemo spojiti na napon viši za $\sqrt{3}$ puta, tj. $\sqrt{3}\cdot 6 \approx 10$ kV. Pri tome vrijednost napona sekundara ostaje nepromijenjena.

Promjenom spoja namotaja napon možemo regulisati i na sekundarnoj strani.

Transformatori se grade i sa namotajima primara koji se sastoje iz dva ili više jednakih dijelova spojenih u seriju ili paralelno.

Na sl. 1.71a. prikazan je primar transformatora spojen u zvijezdu za nominalni napon npr. 20 kV. Ukoliko želimo da primar radi sa pola nominalnog napona,



Sl. 1.71. Regulacija napona primara dijeljenjem namotaja: a) za nominalni napon primara, b) za polovinu nominalnog napona primara.

tj. sa 10 kV, njegove namotaje izradimo tako da na svakom jezgru imamo po dva jednaka polunamotaja. Gornju polovinu namotaja gdje smo izvršili presijecanje spajamo u zvjezdište, dok krajeve presječene donje polovine namotaja spajamo sa početcima namotaja, tako da dobivamo dvije zvijezde koje su spojene paralelno (sl. 1.70b).

Ako je N_1 broj navoja primara, a U_1 fazni napon po fazi, vrijednost indukovanog napona po navoju prije prespajanja biće:

$$E_1 = \frac{U_1}{N_1} \qquad \ldots\ldots (1.83)$$

a poslije prespajanja

$$E_1 = \frac{U_1/2}{N_1/2} = \frac{U_1}{N_1} \qquad \ldots\ldots (1.84)$$

iz čega proizlazi da je indukovani napon po navoju ostao isti, a to znači da će sekundarni napon ostati nepromijenjen.

Prema zahtjevu naručioca, tvornice ovo prespajanje izvode preklopkom koja ima ručicu izvan kotla transformatora ili prespajanjem priključaka bilo lemljenjem ili stezaljkama. Da se uradi ovo posljednje, potrebno je otvoriti transformator.

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

1. Objasni „američki način trofazne transformacije"!
2. Objasni „evropski način trofazne transformacije"!
3. Kako možemo spojiti namotaje trofaznih transformatora?
4. Nacrtaj spoj namotaja transformatora zvijezda — zvijezda i ustanovi dobre i loše strane ovog spoja!
5. Nacrtaj spoj namotaja transformatora zvijezda — zvijezda cik-cak i ustanovi dobre i loše strane ovog spoja!
6. Kako označavamo spojeve namotaja trofaznih transformatora?
7. Šta nazivamo faznim pomakom i kako se on određuje?
8. Kada se radi o grupi spoja *Yy*0?
9. Šta pokazuje oznaka grupe spoja *Yy*6?
10. Nacrtaj grupu spoja *Yz*11!
11. Šta znači paralelni rad transformatora i koje uslove moraju ispunjavati transformatori da bi uspješno zajednički radili?
12. Zašto je potrebno vršiti regulaciju napona transformatora?
13. Kako vršimo regulaciju napona transformatora u beznaponskom stanju, a kako kada je transformator u pogonu?
14. Objasni regulaciju napona transformatora prespajanjem namotaja!

1.7. POSEBNE VRSTE TRANSFORMATORA

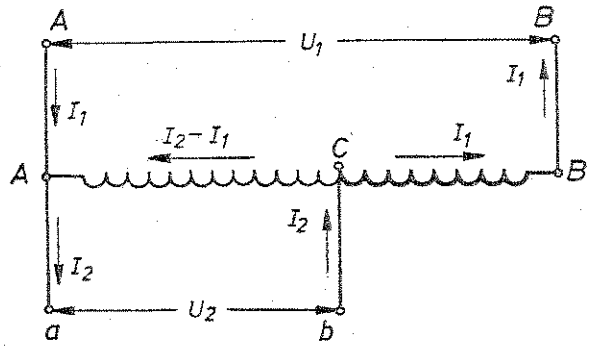
Do sada smo govorili o energetskim transformatorima koji se upotrebljavaju u sistemu prenosa i raspodjelu električne energije. Pored njih ima dosta transformatora posebne vrste koji se po radu ne razlikuju od do sada izučavanih transformatora, ali je njihova konstruktivna izvedba prilagođena za specijalnu upotrebu.

Tu spadaju transformatori s jednim namotajem (autotransformatori), transformatori za zavarivanje, mjerni transformatori, regulacioni transformatori kao i tronamotni transformatori, koji spadaju u energetske transformatore.

Osim ovih o kojima ćemo posebno govoriti, imamo transformatore za indukcione i lučne peći, za ispravljače, razne vrste transformatora u tehnici slabe struje, transformatore koji se upotrebljavaju za razna ispitivanja u laboratorijima itd.

1.7.1. **Autotransformator**

Iz dosadašnjeg izlaganja o jednofaznim i trofaznim transformatorima vidjeli smo da primarni i sekundarni namotaji nemaju nikakvog električnog spoja. Međutim, postoji jedna vrsta transformatora (i jednofaznih i trofaznih) čiju primarnu i sekundarnu stranu čini samo jedan namotaj smješten na istu željeznu jezgru. Zbog toga što imaju samo jedan namotaj po svakoj fazi, dobili su naziv autotransformatori ili kako ćemo kasnije uočiti, transformatori u štednom spoju. Na sl. 1.72. predstav-



Sl. 1.72. Shema autotransformatora koji snižava napon

ljena je shema jednofaznog autotransformatora koji služi za snižavanje napona. Naravno, ukoliko bi na krajeve sadašnjeg sekundarnog namotaja a i b doveli napon iz električne mreže, on bi imao ulogu primara, a sekundar bi bio cijeli namotaj A i B. U tom slučaju bi imali autotransformator koji podiže napon.

Sa slike se jasno vidi da je A-B primarni namotaj sa N_1 brojem navoja i naponom U_1. Sekundarni namotaj predstavlja jedan dio primarnog namotaja između tačaka A i C s brojem navoja N_2 i naponom U_2.

Kako se ponaša autotransformator pri raznim režimima rada?

Pri praznom hodu dovedeni napon U_1 kroz primarni namotaj tjera struju I_0. Ona stvara magnetski tok Φ koji zatvarajući se kroz željeznu jezgru stvara indukovani napon E koji čitavom svojom veličinom sačinjava indukovani napon primarne strane E_1 ($N_{AB}=N_1$), a samo jednim svojim dijelom indukovani napon E_2 ($N_{AC}=N_2$). Ova dva indukovana napona, budući da su nastala od istog magnetskog toka zavise samo od broja navoja koji sačinjavaju strane transformatora ($E_{AB}=E_1$ i $E_{AC}=E_2$). To znači, da će prenosni odnos, kao i kod transformatora sa električki odvojenim namotajima, biti:

$$\frac{E_1}{E_2}\approx\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=k \qquad \ldots\ldots (1.85)$$

gdje je k_A odnos transformacije autotransformatora. Autotransformator se u praznom hodu ponaša isto kao dvonamotni transformator.

Pri opterećenju (ako na sekundar priključimo neko trošilo), ponašanje autotransformatora je nešto drukčije. Pošto je struja sekundara uvijek po smjeru suprotna struji primara, a u našem slučaju je i veća po svojoj vrijednosti od primarne, to

će dijelom namotaja A-C teći razlika struje I_2-I_1 u smjeru veće struje I_2. Nije teško zaključiti da se presjek provodnika zajedničkog dijela namotaja određuje prema razlici struja i prema gustini struje koja mora biti ista u oba dijela. Tako se postiže znatna ušteda u bakru, a time i manji gubitak snage i aktivni pad napona. To je razlog što se ovakva vrsta transformatora naziva još i transformator u štednom spoju.

Budući da je I_2 struja koju transformator odaje preko svoje sekundarne strane, a $\Delta I_2=I_2-I_1$ struja koja stvarno teče kroz navoje sekundara, transformator očito može biti znatno manji, lakši i jeftiniji, jer on, u stvari, transformiše samo snagu u iznosu

$$\Delta P_2=U_2\Delta I_2 \qquad \ldots\ldots (1.86)$$

iako sekundarna strana odaje snagu

$$P_2=U_2I_2 \qquad \ldots\ldots (1.87)$$

Razlika ove dvije snage

$$P_2-\Delta P_2$$

$$U_2I_2-U_2\Delta I_2 \qquad \ldots\ldots (1.88)$$

predstavlja u stvari električnu snagu U_2I_1, koja se direktno prenosi sa primarne na sekundarnu stranu.

Ako već poznati odnos $I_1=I_2\,N_2/N_1$ uvrstimo u formulu za transformiranu snagu ΔP_2, dobivamo:

$$\Delta P_2=U_2\Delta I_2=U_2\,(I_2-I_1)=U_2\left(I_2-I_2\frac{N_2}{N_1}\right).$$

Daljnjim uređenjem biće:

$$\Delta P_2=U_2I_2\left(1-\frac{N_2}{N_1}\right), \text{ odnosno}$$

$$\Delta P_2=P_2\left(1-\frac{N_2}{N_1}\right) \qquad \ldots\ldots (1.89)$$

Iz dobivenog izraza vidi se da će autotransformator kojim se prenosi izvjesna snaga snižavanjem primarnog napona biti sve manji što je odnos N_2/N_1 bliži jedinici.

Pošto je $U_1/U_2=N_1/N_2$,

jednačina (1.87) može dobiti i ovaj oblik

$$\Delta P_2=P_2\left(1-\frac{U_2}{U_1}\right) \qquad \ldots\ldots (1.90)$$

Analogno ovom izrazu, za autotransformator koji podiže napon biće

$$\Delta P_2=P_2\left(1-\frac{U_1}{U_2}\right) \qquad \ldots\ldots (1.91)$$

Da zaključimo:

Prilikom prenosa neke određene snage potreban je autotransformator za mnogo manju snagu od one koju bi, prema veličini prenosne snage, trebao imati transformator čiji su namotaji električki odvojeni.

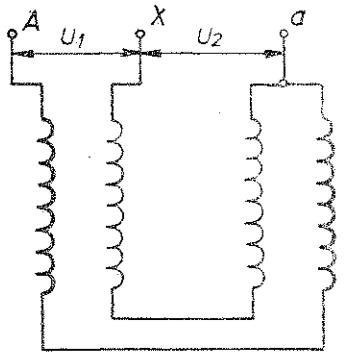
I pored već pomenutih prednosti, autotransformator nema široku primjenu, odnosno ne upotrebljavamo ga umjesto dvonamotnog transformatora. Zašto? Namotaji niskog i visokog napona su električki povezani. Pri normalnom radu visoki napon se neće pojaviti u namotaju niskog napona. Međutim, u prelaznim stanjima koja nastaju iznenadnim promjenama opterećenja (uključenje ili isključenje većeg broja snažnih trošila) ili uslijed atmosferskih pražnjenja (grom, munja) postoji velika vjerovatnoća pojave visokog napona u sekundaru. To bi izazvalo uništenje transformatora, a predstavlja i opasnost po ljudski život. Zato se u mrežama srednjeg i visokog napona upotrebljavaju autotransformatori kod kojih razlika između primarnog i sekundarnog napona ne prelazi granicu od 25%, odnosno prenosni odnos nije veći od 1,25. U mrežama niskog napona autotransformatori se upotrebljavaju i za veće prenosne odnose, ali ne veće od 2.

U mrežama srednjeg i visokog napona autotransformatori se upotrebljavaju kao regulacioni, tj. za podešavanje napona, dok se u mrežama niskog napona upotrebljavaju za puštanje u rad sinhronih i asinhronih motora kao djelitelji napona u ispitnim stanicama i laboratorijama, kao oni koji povisuju i snizuju napone u prenosnim linijama.

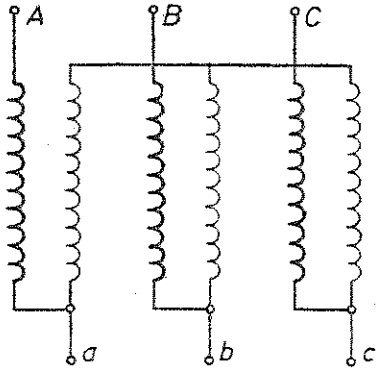
Vrlo su interesantni autotransformatori za snižavanje napona. Tako je pomoću autotransformatora s prenosnim odnosom $k_A = 1{,}5$ napon jedne od prenosnih linija bio povećan sa 150 na 220 kV. Ili, prilikom rekonstrukcije elektrane generator za 11 kV bio je priključen na mrežu od 22 kV preko autotransformatora snage od oko 60 000 kVA.

Da magnetsko rasipanje bude što manje, dijelovi namotaja koji pripadaju nižem i višem naponu izvode se u dva sloja (sl. 1.73). Oko jezgra se stavljaju polovine zajedničkog dijela namotaja, a oko njih po polovina dijela koji pripada samo višem naponu.

Na sl. 1.74. prikazano je izvođenje namotaja trofaznog autotransformatora. Oko svakog jezgra stavljaju se posebni namotaji primara i sekundara koji su povezani kao na slici.



Sl. 1.73. Način izvođenja namotaja jednofaznog autotransformatora

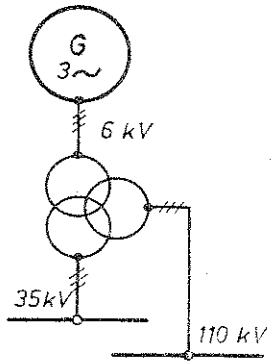


Sl. 1.74. Način izvođenja namotaja trofaznog autotransformatora

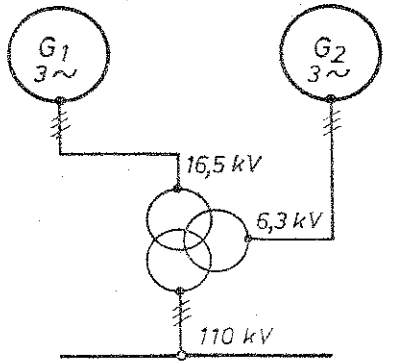
1.7.2. **Tronamotni transformator**

U mnogim slučajevima potrebno je iz iste elektrane ili transformatorske stanice razvesti električnu energiju u raznim pravcima pod naponima različite vrijednosti. Često se u takvim slučajevima umjesto većeg broja transformatora sa dva namotaja upotrebljava transformator s tri namotaja. Npr. električnu energiju koju proizvodi generator u elektrani pod naponom od 6 kV treba usmjeriti u dva različita pravca pod naponima od 35 i 110 kV. Umjesto dva dvonamotna transformatora upotrijebićemo jedan tronamotni transformator sa jednim primarom (6 kV) i dva sekundara (35 i 110 kV), kako je predstavljeno na sl. 1.75.

Nije rijedak slučaj da iz dva električna izvora (dva generatora) trebamo usmjeriti električnu energiju u jednom pravcu. U ovom slučaju opet ćemo upotrijebiti transformator sa tri namotaja, od kojih su u ovom slučaju dva primara a jedan sekundar (sl. 1.76).



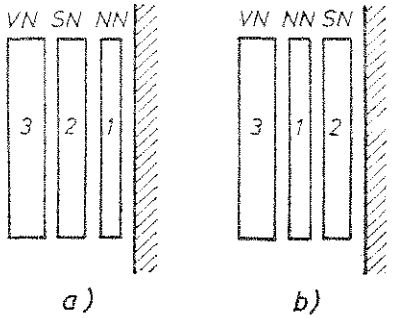
Sl. 1.75. Tronamotni transformator sa jednim primarom i dva sekundara



Sl. 1.76. Tronamotni transformator sa dva primara i jednim sekundarom

Na željeznu jezgru stavljaju se tri namotaja: namotaj nižeg napona (*NN*), srednjeg napona (*SN*) i višeg napona (*VN*). Prvi smo označili sa 1, drugi sa 2, a treći sa 3.

Rad tronamotnih transformatora zasniva se na istim fizičkim osnovama kao i rad dvonamotnih transformatora. Međutim, pojava magnetskog rasipanja kod tronamotnih transformatora mnogo je složenija. Naime, po zakonu indukcije namotaji međusobno djeluju jedan na drugi, odnosno pored rasipnih magnetskih tokova oko jednog od tri namotaja imamo i one koji se zatvaraju oko bilo koja dva namotaja. Ne ulazeći u teoretska razmatranja, najmanje magnetsko rasipanje, a prema tome i vrijednost induktivnog pada napona biće ako se namotaji smjeste na željeznu jezgru prema rasporedu, kako je dato na sl. 1.77.



Sl. 1.77. Raspored namotaja tronamotnog transformatora

Za nominalnu snagu tronamotnog transformatora uzima se snaga njegovog najsnažnijeg namotaja, tj. snaga namotaja koji ima ulogu primara ili sekundara.

Kod transformatora sa tri namotaja postoje i tri različita odnosa transformacije: k_{12} između namotaja NN i SN, k_{13} između namotaja NN i VN i k_{23} između namotaja SN i VN. Svi ovi odnosi određuju se isto kao i kod dvonamotnih transformatora i to iz pokusa praznog hoda i glase:

$$k_{12}=\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}; \qquad k_{13}=\frac{E_1}{E_3}=\frac{N_1}{N_3} \quad \text{i}$$

$$k_{23}=\frac{N_2}{N_3}=\frac{N_2/N_1}{N_3/N_1}=\frac{1/k_{12}}{1/k_{13}}=\frac{k_{13}}{k_{12}} \qquad \ldots\ldots (1.92)$$

Pokus kratkog spoja kod tronamotnog transformatora izvodi se tri puta:
- između namotaja NN i SN,
- između namotaja NN i VN,
- između namotaja SN i VN.

Pri svakom ovom pokusu jedan od preostalih namotaja ima otvorene krajeve.

Naponi kratkog spoja dobiveni na ovaj način zavise od položaja namotaja na jezgru. Naime, najviši napon kratkog spoja biće između namotaja koji su najudaljeniji jedan od drugoga, jer su rasipni tokovi u ovom slučaju najveći.

Prema sl. 1.77a, najveći relativni napon kratkog spoja u (%) je između namotaja NN i VN, odnosno 1 i 3, a u drugom slučaju (sl. 1.77b) između namotaja SN i VN odnosno 2 i 3. U oba slučaja on iznosi oko 17%. Najmanji relativni napon kratkog spoja u (%) dobiva se između namotaja NN i SN, odnosno 1 i 2, i iznosi oko 6%. Ovo pokazuje da su i padovi napona tronamotnih transformatora veći nego kod transformatora s dva namotaja.

Paralelni rad tronamotnih transformatora izvodi se pod istim uslovima koji važe i za transformatore s dva namotaja.

Najčešće grupe spoja tronamotnih transformatora su YYd_{12-11} i YDd_{11-11}.

Tronamotni transformatori imaju vrlo široku primjenu i grade se obično za velike snage. Jednofazni tronamotni transformatori snage od 5 000 do 40 000 kVA, a trofazni od 6 000 do 60 000 kVA.

Stepen korisnog djelovanja kod tronamotnih transformatora je vrlo visok i kreće se od 0,98 do 0,99.

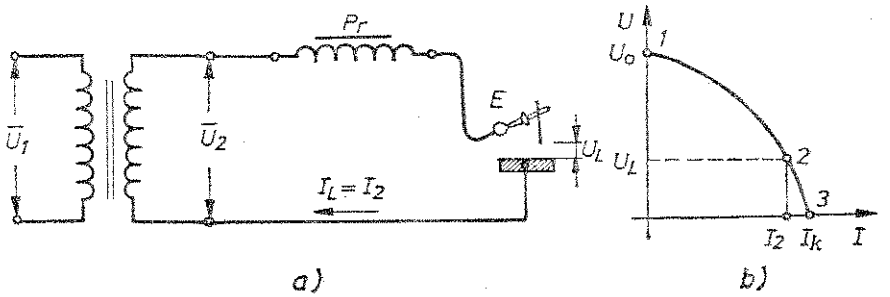
NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

1.7.3. **Transformatori za zavarivanje**

Konstrukcija transformatora za zavarivanje zavisi od toga kakva je operacija zavarivanja (lučna, šavna ili tačkasta). Ovdje ćemo govoriti samo o transformatorima za elektrolučno zavarivanje, čija je shema predstavljena na sl. 1.78a.

Na jedan kraj transformatora direktno je spojen predmet koji treba zavariti, dok se drugi kraj spaja preko prigušnice P_r na metalnu elektrodu E za varenje.

Prigušnica ima zadatak da snižava napon, odnosno ograničava struju u električnom kolu. Spajamo je serijski sa transformatorom samo onda kada je unutrašnji pad napona transformatora malen, pa njime nije moguće postići potrebnu vanjsku karakteristiku.



Sl. 1.78. Shema spoja jednofaznog transformatora za elektrolučno zavarivanje sa dijagramom vanjske karakteristike

Vrijednost napona praznog hoda transformatora za zavarivanje koji je potreban za paljenje električnog luka kreće se u granicama od 60 do 70 V. Da bi električni luk, gdje se električna energija pretvara u toplotu, bio stabilan, vanjska karakteristika mora naglo padati, kako je to prikazano na sl. 1.78b.

Uspostavljanje električnog luka ostvarujemo kratkim spojem transformatora (dodir elektrode sa predmetom koji zavarujemo), i to u ovom slučaju smatramo normalnim pogonskim stanjem transformatora. Ovo traje vrlo kratko vrijeme i odgovara tački 3 na vanjskoj karakteristici transformatora kada sekundarnim namotajem teče struja I_k. Ako malo udaljimo elektrodu od predmeta, između njih nastaje električni luk. Ovom pogonskom stanju na vanjskoj karakteristici odgovara tačka 2, pri čemu je struja manja i odgovara vrijednosti I_2 za sekundarni napon U_2. Napon U_2 održava električni luk i zove se napon luka U_L. Ukoliko udaljavanje elektrode od predmeta povećavamo, dolazi do gašenja luka i u tom momentu transformator će se naći u stanju praznog hoda. To stanje na vanjskoj karakteristici odgovara tački 1. Jasno je da kroz sekundarni namotaj neće teći struja (sekundarni krajevi otvoreni) iako na njegovim krajevima postoji napon U_0. Njegova vrijednost ne smije preći granicu koja može biti opasna po život varioca. Ta granica je 75 V.

Kada je transformator za zavarivanje opterećen, tj. kada održava električni luk, jedan dio napona troši se na održavanje električnog luka U_L, a drugi dio na padove napona na aktivnim i induktivnim otporima transformatora. Ukoliko transformator ima spojenu i prigušnicu, onda se drugi dio napona dijeli i na padove napona nastale na njenim otporima. Napon U_L koji se troši na održavanje električnog luka kreće se u granicama od 40 do 55% napona U_0. Sekundarna struja opterećenog transformatora bez prigušnice istovremeno je i struja električnog luka, tj. $I_L=I_2$ i njena vrijednost je:

$$I_L=I_2=\frac{\sqrt{U_0^2-U_L^2}}{X_T} \qquad \ldots\ldots (1.93)$$

gdje je X_T induktivni otpor sekundarnog namotaja transformatora.

U kratkom spoju nema električnog luka, pa je struja u sekundarnom kolu

$$I_k = \frac{U_0}{X_T} \qquad \ldots\ldots (1.94)$$

Da bi se dobile potrebne vanjske karakteristike, transformatori za zavarivanje grade se s relativno velikim rasipanjem magnetskog toka koji se dešava ili u samom transformatoru ili u posebnoj prigušnici.

Regulaciju struje zavarivanja možemo vršiti na dva načina:

— stepenasto, prespajanjem dijelova (sekcija) jednog ili više namotaja, kratko rečeno, promjenom napona U_0 i

— kontinuirano, promjenom magnetskog otpora u samom transformatoru ili u prigušnici. To postižemo promjenom veličine zračnog raspora.

Na osnovu načina regulacije struje zavarivanja, transformatore za zavarivanje dijelimo u dvije grupe. To su:

— transformatori za zavarivanje sa normalnim rasipanjem magnetskog toka i prigušnicom i

— transformatori za zavarivanje s većim rasipanjem magnetskog toka.

Rade na principu o kome smo već govorili.

Još da spomenemo da se za specijlno zavarivanje u velikim zavarivačkim pogonima (fabrike kotlova, brodogradilišta itd.) upotrebljavaju trofazni transformatori za elektrolučno zavarivanje vrlo velikih snaga.

Stepen korisnog djelovanja transformatora za elektrolučno zavarivanje u odnosu na energetske transformatore je mnogo manji i iznosi oko 65%. To je razumljivo, jer se pri zavarivanju stalno smjenjuju periodi opterećenja i praznog hoda.

Transformatori za elektrolučno zavarivanje izrađuju se za snage od nekoliko stotina voltampera do nekoliko stotina kilovoltampera. Vrijednost struje kreće se u granicama od desetak ampera do oko 2 000 A.

1.7.4. **Mjerni transformatori**

Zadatak mjernih transformatora je da veoma visoke napone (više hiljada volti) ili velike naizmjenične struje (više stotina i hiljada ampera) transformišu na takve vrijednosti koje odgovaraju opsegu (području) normalnih mjernih instrumenata i brojila, odnosno radnim vrijednostima zaštitnih i sličnih releja. Naime, spajanje instrumenata na veoma visoke napone dovelo bi do toga da instrumenti budu veoma glomazni i skupi zbog potrebe deblje izolacije i velikih presjeka svitaka u instrumentu.

Veoma važan zadatak mjernih transformatora je zaštita od napona dodira (galvensko odvajanje).

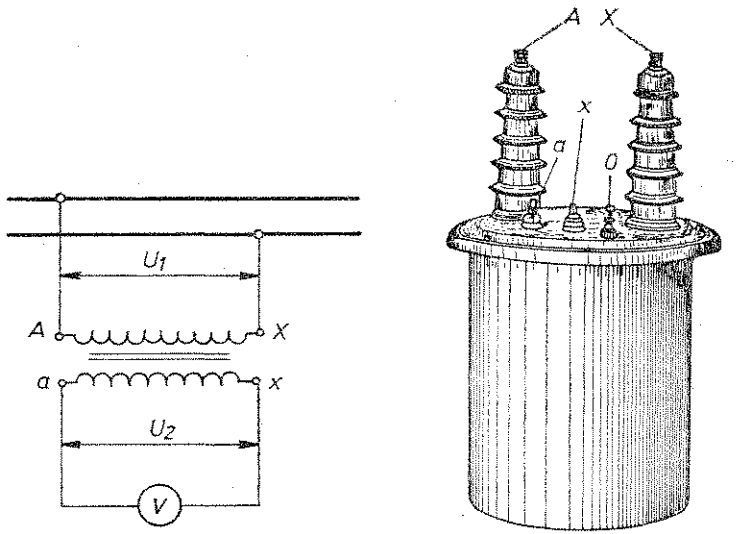
Ovisno o tome da li se upotrebljavaju za indirektno mjerenje napona ili struja, mjerne transformatore dijelimo na:

— naponske mjerne transformatore i

— strujne mjerne transformatore.

Mjerni transformatori, dakle, u području naizmjeničnih struja imaju ulogu koja je analogna ulozi serijskih otpora (predotpora), donosno paralelnih otpora (šantova) u području istosmjernih struja.

Naponski mjerni transformatori. Primar ove vrste transformatora spaja se paralelno s trošilom čiji napon želimo mjeriti, a na sekundar se vezuje mjerni instrument kako je prikazano na sl. 1.79. Zbog tačnosti mjerenja naponski mjerni transformatori treba da budu što manje opterećeni i po tome su vrlo slični energetskim transformatorima u praznom hodu.



Sl. 1.79. Shema spoja naponskog mjernog transformatora

Pri opterećenju, u namotajima naponskog transformatora nastaju padovi napona (aktivni i induktivni) koji remete već poznati prenosni odnos $U_1 : U_2 = N_1 : N_2$, odnosno sekundarni napon biće manji nego pri praznom hodu. Isto tako, između primarnog napona i napona na sekundaru, tj. između napona koji želimo mjeriti i napona koji voltmetar na sekundarnoj strani transformatora stvarno mjeri pojavljuje se fazni pomak. Ugao što ga zatvara vektor primarnog napona U_1 i vektor napona sekundara U_2 predstavlja faznu (ugaonu) pogrešku δ_n koju izražavamo ugaonim minutama. *Naponsku pogrešku* ili *pogrešku prenosnog odnosa* definišemo jednačinom

$$p_n = \frac{k_n U_2 - U_1}{U_1} 100\ (\%) \qquad \ldots\ldots (1.95)$$

gdje je k_n *nominalni prenosni odnos naponskog transformatora.*

Iz ovoga vidimo da pogreške nastaju zbog padova napona u namotajima izazvane opterećenjem transformatora.

Prema klasama tačnosti kojih kod naponskih mjernih transformatora ima pet (0,1; 0,2; 0,5; 1,0 i 3,0), propisima su određene dozvoljene naponske (±0,1%;

$\pm 0{,}2\%$; $\pm 0{,}5\%$; $\pm 1{,}0\%$ i $\pm 3{,}0\%$) i fazne ili ugaone (± 5; ± 10; ± 20 i ± 40) pogreške pri opterećenju između 25 i 100% nominalne snage (kod sekundarnog faktora snage $\cos\varphi = 0{,}8$).

Pošto padovi napona zavise od veličine otpora unutar transformatora, da bi navedene pogreške sveli na najmanju mjeru, izvedba naponskih mjernih transformatora nešto je specifičnija od energetskih transformatora. Naime, namotaji ovih transformatora izvode se sa smanjenom gustinom struje i do 0,3 A/mm² u odnosu na energetske transformatore kod kojih se gustina struje kreće u granicama između 2 i 3 A/mm². Da bi rasipanje magnetskog toka bilo što manje jednofazni naponski transformatori imaju željeznu jezgru ogrnutog tipa, dok je kod trofaznih naponskih transformatora željezna jezgra petostubna.

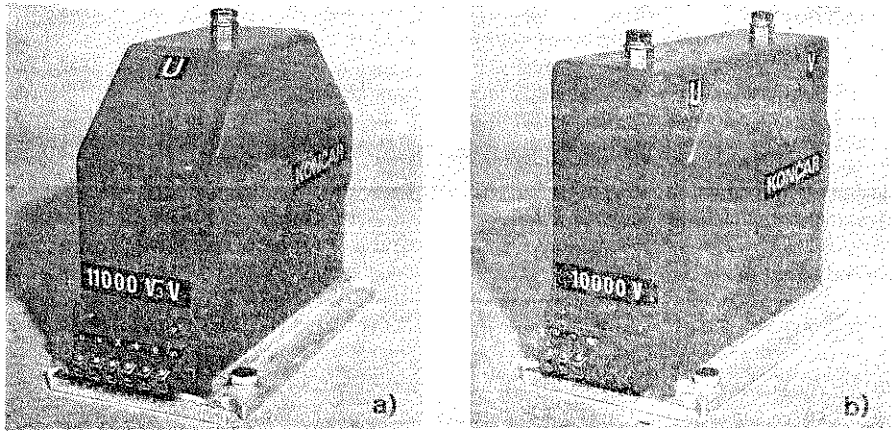
Nominalni naponi mjernih transformatora normirani su, i za primarnu stranu usklađeni s nominalnim naponima mreža (od 1 do 400 kV), dok sekundarni napon iznosi 100 V, a u novije vrijeme i 200 V. Naponski mjerni transformatori sa naponom sekundara od 200 V upotrebljavaju se za velike transformatorske stanice (za vrlo visoke napone), gdje se mjerni instrumenti nalaze na veoma velikoj udaljenosti od mjernih transformatora. Instrumenti koje spajamo na naponske mjerne transformatore imaju mjerni opseg 120 V, dok je skala označena u jedinicama primara transformatora. Naravno, u ovom slučaju na skali mora biti označen prenosni odnos transformatora.

Nominalna snaga naponskog mjernog transformatora je najveća dozvoljena prividna snaga koju može transformator dati (uz faktor snage opterećenja $\cos\varphi = 0{,}8$), a da pri tome pogreške ne pređu dozvoljenu granicu pripadajuće klase tačnosti. Vrijednosti nominalnih snaga su prema propisima standardizirane i kreću se od 5, 10, 15, 30, 60 itd. do 1 000 VA. Naravno, nominalna snaga trofaznog mjernog transformatora je tri puta veća.

S obzirom na izvedbu razlikujemo:

— naponske mjerne transformatore sa suhom izolacijom, koji se upotrebljavaju uglavnom za niže napone (do 10 kV) i

— naponske mjerne transformatore s uljnom izolacijom (od 10, 35, 110 kV)



Sl. 1.80. Naponski mjerni (epoksidni) transformatori za najviši pogonski napon električne mreže 12 kV: a) jednopolno izolovani Tip 4VPA 1—12, b) dvopolno izolovani Tip 4VPA — 12. Proizvođač „Rade Končar" Zagreb

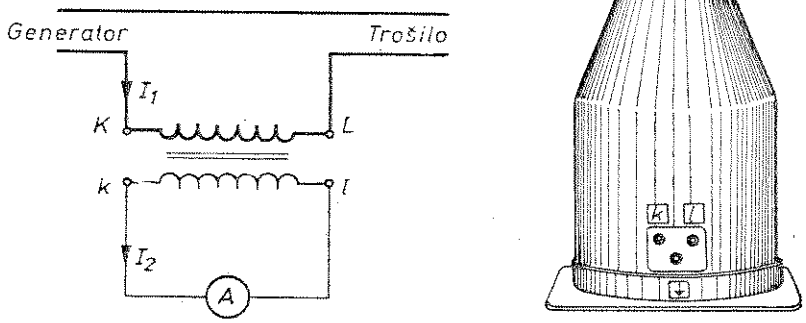
Izvode se kao jednopolno i dvopolno izolovani. Naponski transformatori jednopolno izolovani imaju n. strani visokog napona jedan pol direktno uzemljen. Kod trofaznih petostubnih transformatora umjesto pola može biti uzemljeno zvjezdište.

Naponski mjerni transformatori s uljem smješteni su u kotao malih dimenzija napravljenog od čeličnog lima koji je ispunjen trasformatorskim uljem.

Na sl. 1.80. prikazan je jednopolno i dvopolno izolovani naponski transformator zaliven u epoksidnu masu za najviši pogonski napon mreže od 12 kV. Izrađen je u Tvornici „Rade Končar" u Zagrebu.

Naponski mjerni transformatori za vrlo visoke napone smješteni su u posudu od porculanskog izolatora.

Strujni mjerni transformatori. Ovi mjerni transformatori spajaju se primarno u seriju sa trošilom i treba da transformišu mjerenu struju u stalnom prenosnom odnosu bez faznog pomaka na vrijednost struje prikladne za mjerenje, kako je prikazano na sl. 1.81.



Sl. 1.81. Shema spoja strujnog mjernog transformatora

Za razliku od naponskih mjernih transformatora kod kojih struja u transformatoru zavisi od opterećenja na sekundarnoj strani, kod strujnih mjernih transformatora primarnoj strani struja je nametnuta i teče u dovodnim vodovima prema trošilima. Njenu jačinu određuju trošila, a ne opterećenje na sekundarnoj strani. Primarni napon kod strujnih mjernih transformatora nije ništa drugo nego pad napona na otporima primara izazvan proticanjem primarne struje.

Na sekundarnu stranu strujnog mjernog transformatora mogu da budu spojeni jedan ili više instrumenata npr. ampermetar ili strujni namotaj brojila, odnosno vatmetra itd., iz čega proizlazi da je praktički sekundar kratko spojen. Ovaj kratki spoj ne utiče, kako smo već kazali, na struju primara.

I kod strujnih mjernih transformatora, kako smo već ranije naučili, odnos broja navoja na primaru i sekundaru obrnuto je proporcionalan strujama, tj. $I_1 : I_2 = N_2 : N_1$.

Pri ovome zanemarujemo struju magnetiziranja I_μ koja u izvjesnoj mjeri poremećuje prenosni odnos, odnosno pojavljuju se pogreške.

Pri normalnom radu strujnog mjernog transformatora kroz primar teče struja I_1 koja sa primarnim navojima stvara magnetni napon koji magnetizira željeznu jezgru. Isto čini i sekundarna struja I_2 sa sekundarnim brojem navoja. Pošto struja I_2 ima suprotan smjer u odnosu na struju primara I_1, uspostavlja se određena ravnoteža, odnosno ostaje samo vrlo mali broj ampernavoja (magnetni napon) koji magnetišu željeznu jezgru. Zato je magnetska indukcija u željeznoj jezgri strujnih transformatora vrlo mala i iznosi nekoliko stotinki tesla.

Ukoliko bi došlo do smanjenja struje sekundara I_2 (uslijed povećanja ukupnog prividnog otpora u sekundarnom kolu), zbog poremećene ravnoteže, nije teško zaključiti da bi na primarnoj strani imali povećanje struje I_0, odnosno magnetske indukcije. U krajnjem slučaju, ako bi sekundarnu stranu strujnog transformatora ostavili otvorenu, tj. kad bi se transformator našao u praznom hodu ($I_2 = 0$), došlo bi do velikog porasta magnetske indukcije u željeznoj jezgri. Naime, magnetisanje željezne jezgre vrše samo ampernavoji (magnetski napon) primara koje uzrokuje cjelokupna struja I_1. Uslijed toga, pored porasta magnetske indukcije, rastu i gubici u željeznoj jezgri, odnosno dolazi do povećanog zagrijavanja koje bi moglo da ošteti izolaciju. Osim toga, zbog znatno veće magnetske indukcije dolazi do indukovanja višeg napona koji može izazvati proboj izolacije namotaja i uništenje transformatora.

Treba zapamtiti: *sekundarna strana strujnog mjernog transformatora ne smije nikada biti otvorena.*

Prilikom transformacije struja, i kod strujnog mjernog transformatora nastaju pogreške. Pojavljuje se razlika između struja primara i sekundara i po veličini i po fazi. Razlika je nastala zbog struje praznog hoda I_0, odnosno, bolje kazano, zbog struje magnetiziranja I_μ. Da bi ona bila što manja, mora biti što manja magnetska indukcija u željeznoj jezgri i što manji zračni zazor. Strujni mjerni transformatori se zbog toga grade sa relativno velikom željeznom jezgrom bez zračnog zazora, od materijala sa velikom početnom permeabilnošću.

Ugao što ga zatvara vektor primarne struje U_1 i vektor struje I_2 predstavlja faznu (ugaonu) pogrešku δ_i, koju izražavamo ugaonim minutama. Razlika vrijednosti vektora struja I_1 i I_2 određuje *strujnu pogrešku* ili *pogrešku prenosnog odnosa* koju definišemo jednačinom

$$p_i = \frac{k_i I_2 - I_1}{I_1} 100\ (\%) \qquad \ldots\ldots\ (1.96)$$

gdje je k_i *nominalni prenosni odnos strujnog transformatora.*

Iz izraza (1.96) lako zaključujemo da će pogreška biti veća ukoliko je struja sekundara I_2 manja. Isto se to dešava ako je ugao između struja veći. Da bi strujni transformator bio u granicama propisima određene klase tačnosti, potrebno je osigurati veliku vrijednost struje I_2. To postižemo dozvoljenim prividnim otporom (impedancom) spojenim na sekundarne krajeve. Taj prividni otpor (izražen u omima) zove se prividni otpor ili impedancija transformatora.

Kako se sa sl. 1.81. vidi, primarne krajeve strujnih transformatora označavamo velikim slovima K i L, a sekundarne malim slovima k i l. Spajanje strujnih transformatora izvodimo uvijek tako da struja kroz transformator teče od K prema L. Dakle, kraj K je na strani generatora, a kraj L na strani trošila.

Strujni mjerni transformatori upotrebljavaju se za mjerenja u nisko i visokonaponskim električnim kolima. Za mjerenja u visokonaponskim električnim kolima mjerni transformatori treba da su odgovarajuće izolovani. Pri tome kućište obavezno uzemljujemo.

U električnim mrežama dolazi i do kratkih spojeva, pri čemu vrijednost struje znatno poraste, pa se između provodnika stvaraju velike mehaničke sile. To djeluje i na mjerne transformatore, pa moramo voditi računa ne samo o njihovim električnim već i mehaničkim osobinama. Sa vrlo visokim vrijednostima struja dolazi do razvijanja vrlo velike džulove toplote, tako da je mjerni transformator u tim slučajevima izložen i termičkim opterećenjima.

Struju koju strujni transformator treba da izdrži, s obzirom na dinamičko opterećenje, nazivamo nominalnom dinamičkom strujom, a struja koju treba da izdrži, s obzirom na termičko opterećenje, naziva se nominalna termička struja. Oba podatka upisana su u natpisnu ploču transformatora.

Prema procentualnoj vrijednosti maksimalno dozvoljene strujne pogreške, kod nominalne primarne struje strujne mjerne transformatore dijelimo u šest klasa tačnosti 0,1, 0,2, 0,5, 1, 3 i 5. Nominalne snage strujnih transformatora za mjerenja propisima su određene do 30 VA i iznose 2,5, 5, 10, 15 i 30 VA. Osim u obliku nominalne snage, često se opterećenje strujnih transformatora izražava kao nominalni prividni otpor (impedanca). On direktno pokazuje koliki otpor mora imati sekundarno električno kolo. Nominalni prividni otpor opterećenja Z_n određuje se iz nominalne snage P_n formulom

$$Z_n = \frac{P_n}{I_{2n}^2} \qquad \ldots\ldots\ (1.97)$$

gdje je I_{2n} nominalna sekundarna struja.

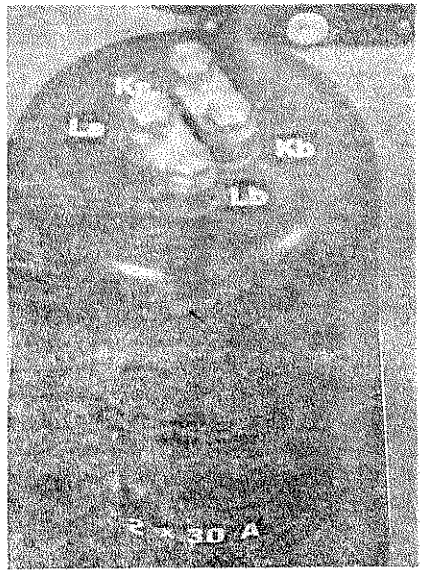
S obzirom na izvedbu, razlikujemo najrazličitije vrste strujnih transformatora. Izvode se kao suhi, uljni i s izolacionim masama.

Suhi strujni transformatori upotrebljavaju se samo za unutrašnju montažu, a grade se za napone do 35 kV.

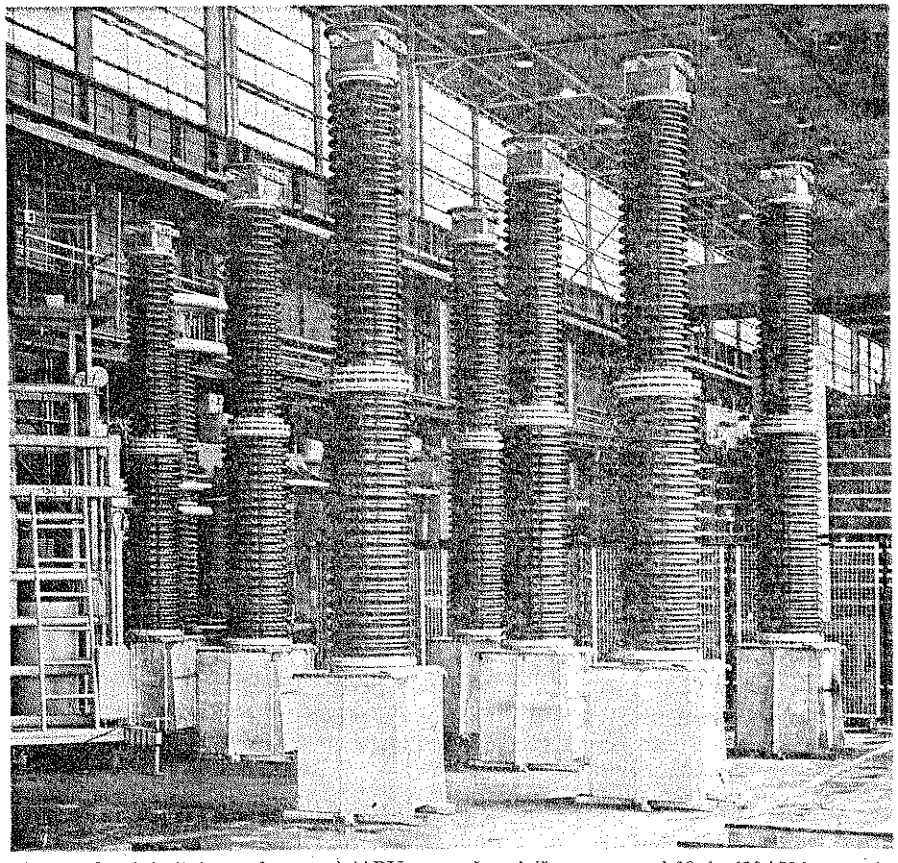
Uljni strujni transformatori upotrebljavaju se i za unutrašnju i vanjsku montažu, a izrađuju se za napone do 60 kV. Ovdje ubrajamo zamkaste, štapne i potporne strujne transformatore za napone do 30 kV.

Na sl. 1.82. prikazan je strujni transformator koji je zaliven epoksidnom masom dobrih izolacionih i mehaničkih svojstava.

Uljni strujni transformator za mreže najvišeg napona od 38 do 420 kV i



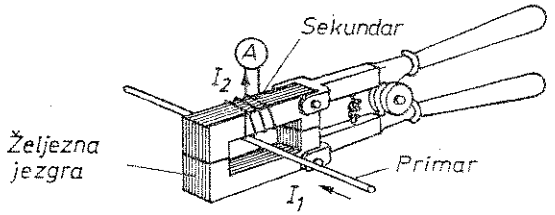
Sl. 1.82. Strujni epoksidni transformatori 3AMA za mreže najvišeg napona od 3,6 do 38 kV i za struje od 50 do 800 A, „Rade Končar" Zagreb



Sl. 1.83. Strujni uljni transformatori 4APU za mreže najvišeg napona od 38 do 420 kV i za struje od 100 do 2 000 A, „Rade Končar" Zagreb

za struje od 100 do 2 000 A prikazan je na sl. 1.83. Vrlo su otporni na udarne napone i kratkotrajna dinamičko-termička opterećenja u slučaju kratkog spoja u mreži.

Još da kažemo da se u praksi upotrebljavaju strujni transformatori, koji omogućavaju brzo i jednostavno mjerenje struje bez prekidanja voda. To su tzv. strujna kliješta (sl. 1.84) koja su izrađena tako da se željezna jezgra može otvarati i zatvarati. Kad se provodnik obuhvati, jezgru zatvaramo, a potom vršimo mjerenje. Kako se sa slike vidi, primar predstavlja provodnik koji u sekundarnom namotaju indukuje napon proporcionalan struji koja teče provodnikom. Sa ampermetra direktno očitavamo vrijednost struje koja teče provodnikom.



Sl. 1.84. Strujna kliješta

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

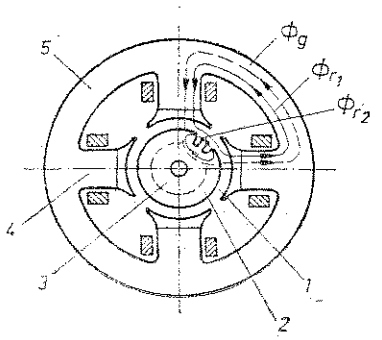
1. Nacrtaj shemu transformatora u štednom spoju i opiši njegov način rada!
2. Koje su dobre, a koje loše strane autotransformatora?
3. Gdje primjenjujemo autotransformator?
4. Kakvu ulogu imaju tronamotni transformatori u elektroenergetskim postrojenjima?
5. Nacrtaj shemu transformatora za zavarivanje i njegov način rada!
6. Koji zadatak imaju mjerni transformatori?
7. Nacrtaj shemu spoja naponskog mjernog transformatora i objasni njegov način rada!
8. Koje načine izvedbe naponskih mjernih transformatora imamo i gdje se upotrebljavaju?
9. Nacrtaj shemu spoja strujnog mjernog transformatora i objasni njegov način rada!
10. Koje načine izvedbe strujnih mjernih transformatora imamo i gdje se upotrebljavaju?

ASINHRONE MAŠINE

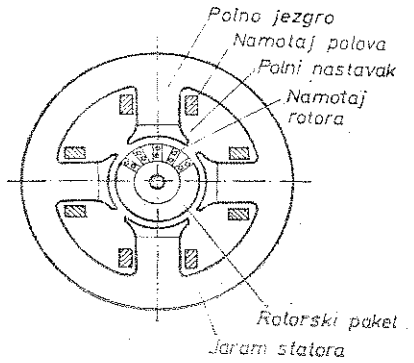
2.1. ELEKTRIČNO I MAGNETNO KOLO OBRTNIH ELEKTRIČNIH MAŠINA

2.1.1. Osnovni pojmovi

Magnetsko kolo svake električne mašine čine oni dijelovi kroz koje prolazi korisni magnetski tok (fluks) namijenjen indukovanju napona. Pored korisnog (tzv. glavnog) magnetskog toka, u mašini se pojavljuju i rasipni magnetski tokovi, koji se zatvaraju ne samo unutar magnetskog kola već i izvan njega. Na sl. 2.1. prikazani su osnovni dijelovi magnetskog kola. Svaka vrsta električne mašine nema sve dijelove magnetskog kola kako je prikazano na slici. Naime, asinhrona mašina, npr. nema izraženih



Sl. 2.1. Osnovni dijelovi magnetskog kola. 1 — zračni zazor, 2 — pojas (zona) utora i zubaca, 3 — jaram rotora, 4 — magnetni pol, 5 — jaram statora.

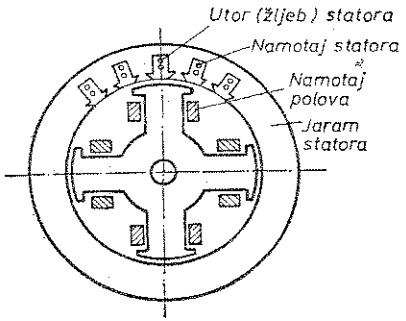


Sl. 2.2. Osnovni sastav istosmjerne mašine

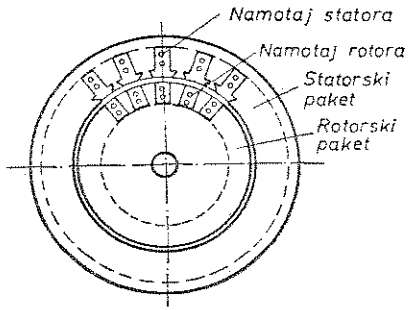
(istaknutih) polova ni jarma polova već ima dva pojasa (zone) utora i zubaca i dva jarma koji pripadaju cilindričnom rotoru i statoru. Silnice glavnog magnetskog toka označene su sa Φ_g, a silnice rasipnog toka sa Φ_{r1} i Φ_{r2}.

Električno kolo svih električnih mašina čine njihovi namotaji. Kroz njih teče struja, bilo da je dovedena iz električnog izvora ili je nastala indukovanjem u samoj

mašini. Struje koje teku namotajima stvaraju magnetski tok u mašini. Namotaji čiji je osnovni zadatak da stvaraju i održavaju magnetsko polje u mašini nazivaju se *pobudni* ili *uzbudni namotaji*. Pored njih, imamo namotaje kojima je prvenstvena namjena da se u njima indukuje napon. Kroz takve namotaje protiče energija koja se pretvara u mehanički oblik ili obratno, nastala je od takvog oblika. Ovi namotaji spojeni su na izvor ili trošilo električne energije i zovu se *armaturni namotaji*.



Sl. 2.3. Osnovni sastav sinhrone mašine



Sl. 2.4. Osnovni sastav asinhrone mašine

Na sl. 2.2. i 2.3. predstavljen je osnovni sastav istosmjerne i sinhrone mašine. Kako se sa slika vidi, pobudni namotaji kojima protiče istosmjerna struja su namotaji polova koji se kod istosmjernih mašina nalaze na nepokretnom dijelu mašine (statoru), a kod sinhronih mašina na pokretnom dijelu (rotoru). Sa istih slika je vidljivo da se armaturni namotaji kod istosmjernih mašina nalaze na rotoru, a kod sinhronih na statoru.

Na sl. 2.4. predstavljen je osnovni sastav asinhrone mašine iz koga se vidi da su oba namotaja i statorski i rotorski armaturni. Značajno je kazati da armaturni namotaj statora asinhrone mašine daje osnovnu pobudu magnetskog polja, a u njemu se ujedno vrši indukovanje napona i protiče energija koja se pretvara u mehanički oblik ili je nastala od tog oblika. Zbog toga je ovaj namotaj i pobudni i armaturni, pa je po svojoj fizičkoj namjeni najsličniji primarnom namotaju transformatora.

2.1.2. **Vrste induktora**

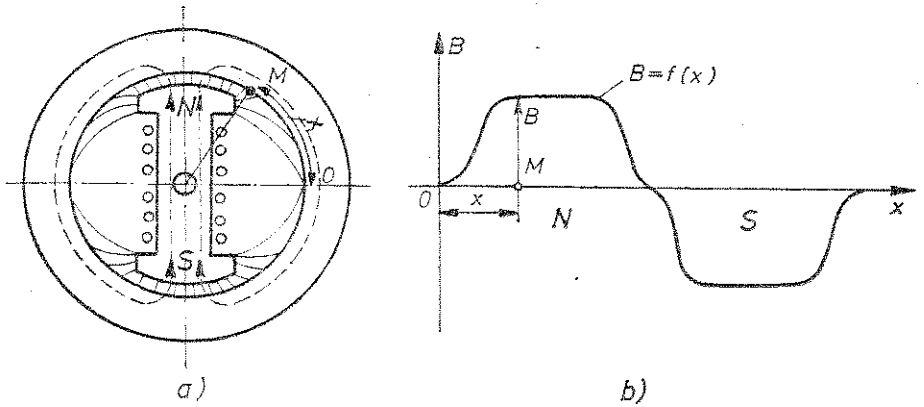
Svaka električna mašina, kako smo već vidjeli, sastoji se od dva glavna (aktivna) dijela. To su *stator* i *rotor*. Stator je nepokretni, a rotor obrtni dio mašine. I u jednom i u drugom dijelu smješteni su namotaji. Namotaj statora ili rotora u kome se stvara prvobitni magnetski tok (pobuduje magnetsko kolo) nazivamo *induktor*. Namotaj u kome se pod uticajem magnetskog toka induktora vrši indukcija (indukuje napon i struja) zove se *indukt*. Upoređujući ga s transformatorom, induktor ima ulogu primarnog, a indukt sekundarnog namotaja.

Imamo dvije vrste induktora. To su:

— *induktori s izraženim (istaknutim) polovima* i

— *induktori s neizraženim ili neistaknutim (putni induktor) polovima.*

Induktor s izraženim polovima. U namotaje induktora s izraženim polovima, čiji je shematski prikaz predstavljen na sl. 2.5a, najčešće dovodimo istosmjernu struju. Između polova i šupljeg valjka (indukta) nalazi se mali zračni zazor (međuželjezo). Okomito rastojanje između pola i nasuprotne površine indukta zove se dužina zračnog zazora i označava se sa δ. Kada kroz pobudni namotaj induktora teče struja, stvara se magnetski tok koji izlazi iz sjevernog pola N, prolazi kroz zračni zazor, ulazi u indukt, zatvara se kroz njegov jaram, ponovo prolazi kroz zračni zazor i ulazi u južni pol S induktora. Pošto silnice magnetskog toka u svakoj tački zračnog zazora, kako je na slici predstavljeno, imaju pravac radijusa (poluprečnika), kažemo da je u zračnom zazoru magnetski tok radijalan.



Sl. 2.5. Induktor s dva izražena (istaknuta) pola: a) shematski prikaz, b) dijagram prostorne raspodjele magnetske indukcije duž zračnog zazora.

Na sl. 2.5b. prikazan je dijagram koji nam pokazuje kako se mijenja vrijednost magnetske indukcije B u zračnom zazoru po obodu induktora (osa x predstavlja obim induktora). Jasno se vidi da magnetska indukcija svoju najveću vrijednost u zračnom zazoru ima pod polovima, a da se smanjuje sve više što se udaljava od polova. Kada dođe u ravninu koja stoji okomito na osu polova NS, jednaka je nuli i mijenja svoj smisao (znak). Tu ravninu nazivamo *neutralna ravnina*.

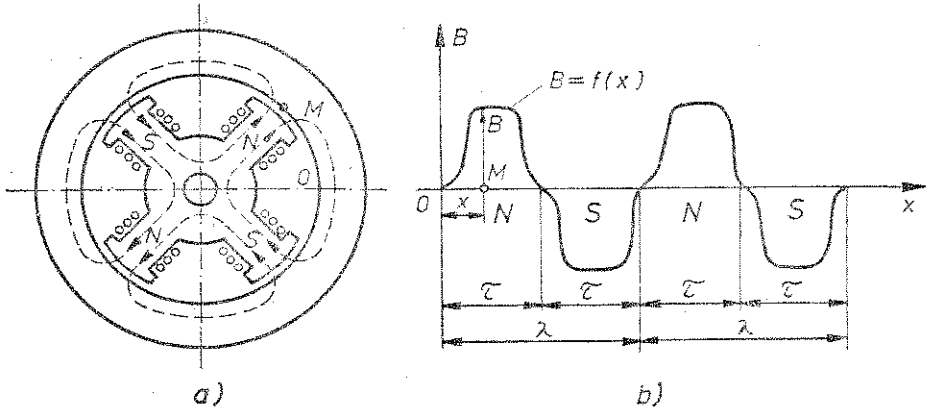
Na sl. 2.6. shematski je predstavljen induktor s četiri izražena magnetska pola i dijagram prostorne raspodjele magnetske indukcije u zračnom zazoru. Jasno se vidi da se promjena vrijednosti magnetske indukcije vrši dva puta na isti način, tj. ponavljanje se vrši onoliko puta koliko induktor ima pari polova.

Sa slike se vidi da svakom polu pripada dio obima induktora. Taj dio nazivamo *polni korak* i označavamo ga sa τ. Ako broj pari polova induktora označimo sa p, onda će ukupni broj polova biti dva puta veći, tj. $2p$. Nije teško ustanoviti da ćemo dijeljenjem obima induktora $D\pi$ sa brojem polova $2p$ dobiti polni korak τ, tj.

$$\tau = \frac{D\pi}{2p} \qquad \ldots\ldots (2.1)$$

Ukoliko obim induktora podijelimo sa brojem pari polova, dobićemo *dvostruki polni korak* λ:

$$\lambda=\frac{D\pi}{p} \qquad \ldots\ldots (2.2)$$



Sl. 2.6. Induktor s četiri izražena (istaknuta) pola: a) shematski prikaz, b) dijagram prostorne raspodjele magnetske indukcije duž zračnog zazora.

Jasno je da dvostruki polni korak ima dva polna koraka, tj. $\lambda=2\tau$.

Induktor može imati i šest ili više polova (uvijek paran broj). Sa ovakvim induktorom (samo sa nejednakom dužinom zračnog zazora) gradeni su sinhroni generatori, i to hidrogeneratori.

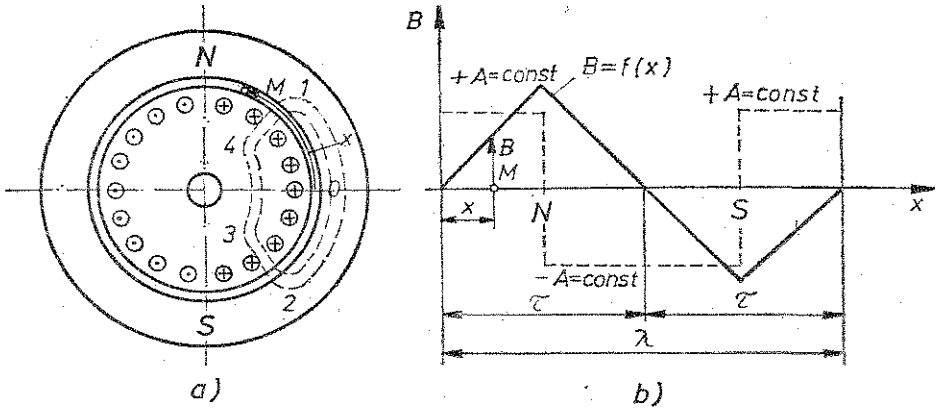
Induktor sa neizraženim polovima. Kod ovog induktora polovi nisu istaknuti, oni su u induktoru sakriveni (formiraju se pomoću namotaja, o čemu će biti riječi kasnije), pa se često ovakav induktor naziva i puni induktor. Raspodjela magnetskog napona dužinom oboda induktora može biti ravnomjerna ili harmonična.

Induktori sa ravnomjernom raspodjelom magnetskog napona imaju pobudni namotaj podijeljen u više navojnih dijelova koji su smješteni u utore raspoređene po obodu na jednakim rastojanjima, tako da je u svaki utor smješten isti broj provodnika. Zračni zazor na svakom mjestu je isti. Ako označimo da pobudni namotaj kroz koji teče istosmjerna struja ima ukupni broj provodnika N, a vrijednost struje u jednom provodniku označimo sa I_1, dobićemo ukupni magnetni napon induktora NI_1 mjeren u amperima (magnetni napon imaće onoliko ampera koliko iznosi umnožak broja provodnika i jačine struje). Ako ukupni magnetni napon podijelimo sa obimom induktora, dobićemo *jedinični magnetni napon* (magnetni napon po jedinici dužine obima induktora). Primjenjujući i formulu (2.1) dobivamo:

$$A=\frac{NI_1}{\pi D}=\frac{NI_1}{\pi\frac{2p\tau}{\pi}}=\frac{NI_1}{2p\tau} \qquad \ldots\ldots (2.3)$$

Jedinični magnetni napon A još se naziva *linearna gustina struje po obimu induktora.*

Na sl. 2.7. shematski je predstavljen induktor sa dva neizražena (neistaknuta) magnetska pola i dijagramom prostorne raspodjele magnetske indukcije u zračnom zazoru. Linearna gustina struje po obimu induktora je stalne vrijednosti, tj. $A=$ $=$const.



Sl. 2.7. Induktor s dva neizražena (neistaknuta) pola: a) shematski prikaz, b) dijagram prostorne raspodjele magnetske indukcije duž zračnog zazora.

Posmatrajmo zamišljenu cijev magnetskog toka označenu na slici tačkama 1, 2, 3 i 4, gdje je u tački M apscise x presjek cijevi S, a magnetska indukcija B, vidjećemo da na ovu cijev djeluju sve struje provodnika koje ona obuhvata, dakle, sve one na luku čija je dužina $2x$ i da će magnetski napon biti:

$$M=2xA$$

Magnetski tok posmatrane cijevi, kako se sa slike vidi, prolazi kroz željezna jezgra induktora i indukta i dva puta kroz zračni zazor. Magnetski otpor što ga pruža zračni zazor je glavni dio otpora (otpor željeznog jezgra induktora i indukta je zanemarljivo mali) i računa se na taj način što se umjesto stvarnog zračnog zazora δ posmatra nešto veći ekvivalentni zračni zazor δ'. Zbog uticaja utora, uzimajući to u obzir, magnetski otpor posmatrane cijevi je:

$$R_M=\frac{2\delta'}{\mu_0 S}.$$

Primjenjujući Kap-Hopkinsonov zakon, magnetski tok Φ u promatranoj cijevi biće:

$$\Phi=BS=\frac{M}{R_M}=\frac{2xA}{\frac{2\delta'}{\mu_0 S}}=\mu_0 S\frac{A}{\delta'}x,$$

odakle dobivamo izraz za magnetsku indukciju:

$$B=\mu_0\frac{A}{\delta'}x \qquad \ldots\ldots (2.4)$$

Kako se sa dijagrama vidi, promjena magnetske indukcije dužinom zračnog zazora vrši se linearno. Također, nije teško uočiti da će magnetska indukcija imati svoj maksimum (pozitivni ili negativni) u onim tačkama zračnog zazora gdje linearna gustina struje mijenja smjer (oznaka ⊕ ili ⊖). Posmatrajući porast lučnog odstojanja x od 0 do $\lambda/4$, ustanovljujemo da je najmanja vrijednost magnetske indukcije za $x=0$, a najveća za $x=\lambda/4$. Uvrštavanjem $x=\lambda/4$ u formulu (2.4) dobivamo:

$$B_m=\mu_0\frac{A}{\delta'}\frac{\lambda}{4}.$$

Vršenjem zamjene za λ i A formule (2.2. i 2.3) dobivamo:

$$B_m=\mu_0\frac{\frac{NI_1}{\pi D}}{\delta'}\frac{\frac{\pi D}{p}}{4}=\frac{\mu_0}{2}\frac{NI_1}{2p}.$$

Pošto izraz $NI_1/2p$ predstavlja broj amperprovodnika po polu, a s obzirom da navojak ima dva provodnika, izraz će označavati broj amperprovodnika po paru polova. To je ujedno i vrijednost magnetskog napona po paru polova.

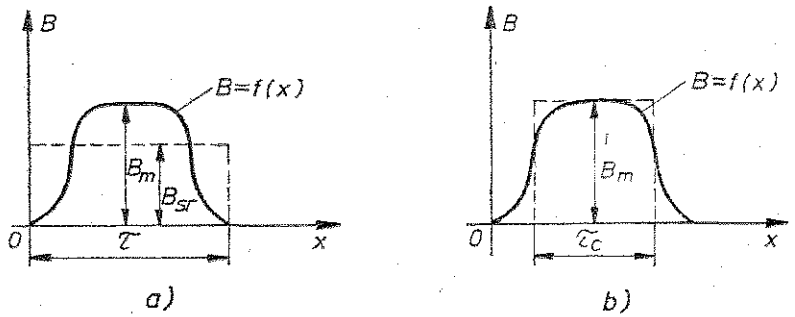
$$M_1=\frac{NI_1}{2p}=\frac{\frac{N}{2}I_1}{p}=\frac{N_nI}{p},$$

gdje je N_n ukupni broj navojaka u induktoru. Možemo zaključiti da najveća vrijednost magnetske indukcije zavisi od broja amperprovodnika po paru polova, odnosno magnetskog napona M_1, dakle:

$$B_m=\frac{\mu_0}{2\delta'}M_1 \qquad \ldots\ldots (2.5)$$

Sa ovakvom izvedbom induktora građeni su sinhroni generatori, i to turbogeneratori.

Magnetski tok po polu induktora. Bez obzira po kakvom se zakonu mijenja magnetska indukcija dužinom zračnog zazora, magnetski tok po polu induktora Φ_{po} možemo izračunati tako da srednju vrijednost magnetske indukcije B_{sr} množimo



Sl. 2.8. Određivanje magnetskog toka po polu induktora: a) korištenjem srednje vrijednosti magnetske indukcije B_{sr}, b) korištenjem maksimalne vrijednosti magnetske indukcije B_m.

sa stvarnom površinom magnetskog pola S_p ili množenjem njene maksimalne vrijednosti B_m sa umanjenom površinom magnetskog pola za neki broj a puta od stvarne, kako je prikazano na sl. 2.8a i b. Dakle:

$$\Phi_{po}=B_{sr}S_{sr}=B_{sr}\tau l \qquad \ldots\ldots (2.6)$$

gdje je l osna dužina induktora

ili

$$\Phi_{po}=B_maS_{sr}=B_ma\tau l=B_m\tau_c l \qquad \ldots\ldots (2.7)$$

gdje se umnožak $\tau_c=a\tau$ naziva umanjeni polni korak, a a koeficijent umanjenja. Vrijednost koeficijenta umanjenja dobivamo po formuli:

$$a=\frac{\tau_c}{\tau}=\frac{B_{sr}}{B_m}.$$

Srednju vrijednost magnetske indukcije dužinom zračnog zazora, pri njenoj harmoničnoj promjeni, dobivamo:

$$B_{sr}=aB_m=\frac{2}{\pi}B_m.$$

Na osnovu izraza za srednju vrijednost magnetske indukcije dobivamo vrijednost magnetskog toka po polu i on iznosi:

$$\Phi_{po}=B_{sr}S_p=\frac{2}{\pi}B_mS_p=\frac{2}{\pi}B_m\tau_c l \qquad \ldots\ldots (2.8)$$

* * * * * * * * *

2.1.3. **Osnovni pojmovi i pravila o izvođenju namotaja**

U prethodnom izlaganju govorili smo o magnetnom i električnom kolu, o magnetskom toku koji stvara struja protičući kroz pobudne namotaje induktora čiji polovi su istaknuti ili neistaknuti. Struja koja je stvarala magnetski tok bila je istosmjerna. Prije nego što pređemo na razmatranje magnetskih tokova u mašinama naizmjeničnih struja upoznaćemo se sa pojmovima, pravilima i načinom izvođenja namotaja tih mašina. Uglavnom će biti govora o namotajima indukta (armature) koji se podjednako odnosi na namotaj statora sinhronih i asinhronih mašina.

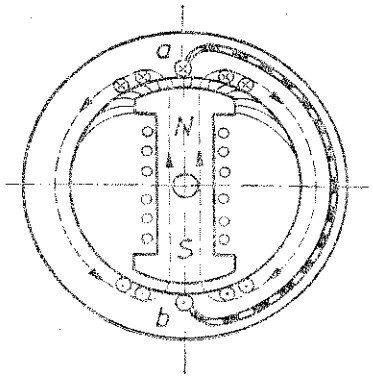
Na primjeru generatora naizmjenične struje čiji je rotor induktor sa dva istaknuta pola, a stator sagrađen kao šuplji valjak sa čije unutrašnje strane se nalaze *utori* ili *žljebovi* sa izolovanim provodnicima, objasnićemo osnovne pojmove i pravila koji su veoma značajni za shvatanje izvedbe višefaznih namotaja.

Sa sl. 2.9. vidi se da silnice magnetskog toka stvorenog pobudnom strujom induktora (rotora) izlaze iz sjevernog pola N, prolaze kroz zračni zazor i utore indukta (statora), dijele se na dva jednaka dijela, idu jarmom statora i ponovo kroz

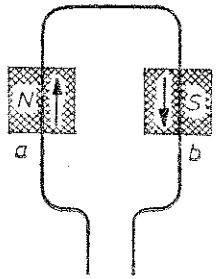
utore i zračni zazor vraćaju se u južni pol *S*. Ovo smo do sada posmatrali u jednom momentu. Međutim, pošto se induktor okreće (obrće), slika će se izmijeniti. Naime, okrećući se, induktor nosi sa sobom polove, pa magnetski tok stvoren od njih sada postaje *obrtni*. On zahvata ili siječe provodnike u utorima statora koji miruju i u njima po zakonu elektromagnetske indukcije indukuje napone čiji smjer odredujemo (poznato u elektrotehnici) po pravilu desne ruke. Ponovimo ga! Silnice magnetskog toka ulaze u dlan, palac označava smjer kretanja provodnika, a ispruženi prsti pokazuju smjer indukovanog napona. Provjeri ovo pravilo na našem primjeru sa slike! Provjereno pravilo će pokazati da će u svim provodnicima koji se u jednom momentu nalaze ispod sjevernog pola *N* indukovani naponi imati jedan smjer, u našem primjeru označen sa ⊙, a u svim onima koji se nalaze ispod južnog pola *S* indukovani naponi će imati suprotan smjer označen sa ⊗. Nije teško zaključiti na osnovu prostorne raspodjele magnetne indukcije (sl. 2.9) da će vrijednosti indukovanih napona biti najveće u provodnicima koji se nalaze u osama polova, a da indukovanih napona neće biti (jednaki nuli) u provodnicima koji se u tom momentu nađu u neutralnoj osi.

Pošto je u našem primjeru najveći indukovani napon u provodniku *a* koji se nalazi u osi sjevernog pola i u provodniku *b* koji se nalazi u osi južnog pola, zaključujemo da ako ih spojimo serijski, u njima će se indukovani naponi sabrati. Na taj način smo dobili prvi elemenat namotaja. To je *navoj (navojak)* (sl. 2.10). *On se, znači, sastoji od dva serijski spojena aktivna provodnika, od kojih se jedan nalazi ispod sjevernog pola, a drugi na istom ili približno istom mjestu ispod južnog pola.*

Više aktivnih navoja spojenih međusobno u seriju, čiji provodnici leže u dva različita utora, ne odstupajući od već naučenog pravila, uvijek pod suprotnim polovima obrazuje cjelinu, tzv. *navojni dio*. Taj dio nazivamo *svitak*, koji je prikazan



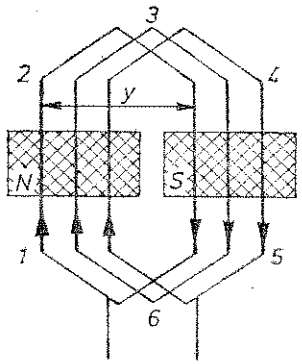
Sl. 2.9. Generator naizmjenične struje



Sl. 2.10. Navoj (navojak)

na sl. 2.11. One strane svitka koje se nalaze u utorima nazivamo aktivnim stranama (u njima se vrši indukcija), a one koje su izvan utora zovemo neaktivnim ili čeonim (u njima se ne vrši indukcija). Zato nastojimo da neaktivne strane budu što kraće radi uštede u bakru.

Rastojanje između aktivnih strana svitka naziva se *navojni korak* i označava se sa *y*. On je obično jednak polnom koraku ($y=\tau$), mada u nekim slučajevima može da bude i veći i manji od polnog koraka. Nije praktično navojni korak izražavati u geometrijskim ili električnim stepenima ($\alpha_{el}=p\alpha_{geom}$). U praksi se uglavnom navojni korak izražava brojem utora, npr. kod već sagrađene mašine uočimo u kojim utorima se nalazi jedan svitak i od njegove prve strane počnemo brojati utore 0, 1, 2, 3... dok ne dođemo do njegove druge strane, npr. do utora 6. Prema tome, navojni korak izražen u utorima je $y=6$. Često se navojni korak označava sa dva broja, u našem primjeru sa $y=1-7$, što pokazuje da je prva strana svitka u utoru 1, a druga u utoru 7, što opet pokazuje da je navojni korak 6 utora.



Sl. 2.11. Navojni dio, svitak: 1—2 i 4—5 su aktivne strane svitka, 2—3—4 i 1—6—5 su neaktivne strane svitka.

Namotaj induktora ili indukta sastoji se od *q* faznih namotaja (faza) sa određenim brojem serijski, paralelno ili serijski-paralelno spojenih svitaka. Pod svakim parom polova, odnosno pod svakim dvostrukim polnim korakom λ mora se nalaziti *q* faznih namotaja. Namotaj jedne faze pod svakim parom polova može imati 1, 2... *m* svitaka. Pošto svaki svitak zauzima dva utora (jedan pod sjevernim, a drugi pod južnim polom), nije teško zaključiti da *m* svitaka zauzima *m* utora pod svakim polom. Znači, *m* predstavlja i broj utora po polu i po fazi.

Da zaključimo: Svici jedne faze smješteni pod svim parovima polova čine namotaj jedne faze ili, drugim riječima kazano, namotaj jedne faze sastoji se od *pm* svitaka. Pošto namotaji svih faza čine namotaj mašine, a ako ona ima *q* faza, onda se namotaj njenog induktora sastoji od *qpm* svitaka.

Broj utora statora ili rotora ne možemo po volji odabrati. On je određen elementima o kojima smo govorili, odnosno formulom

$$Z=2pqm \qquad \ldots\ldots (2.9)$$

Kada nam je poznat ukupni broj utora *Z*, tako postavljamo ove relacije:

Broj utora po polu *z*

$$z=\frac{Z}{2p} \qquad \ldots\ldots (2.10)$$

Broj utora, odnosno svitaka po polu i fazi *m*

$$m=\frac{Z}{2pq} \text{ ili, jednostavnije, } \frac{z}{q} \qquad \ldots\ldots (2.11)$$

Broj utora po polu i po fazi može biti cijeli ili razlomljeni broj. Svaki namotaj sa cijelim brojem utora po polu i po fazi je simetričan i pretežno se upotrebljava pri namatanju statora naizmjeničnih mašina. Namotaji sa razlomljenim brojem utora po polu i fazi npr. 4/5, 3/2, 8/9 itd. su nesimetrični i upotrebljavaju se samo kod sinhronih mašina.

Ukoliko sa N označimo ukupan broj provodnika po fazi statora ili rotora, a sa N_u broj provodnika u jednom utoru, možemo postaviti ove relacije:

Ukupni broj provodnika jedne faze pod svim polovima

$$N=2pqN_u=\frac{z}{q}N_u \qquad \ldots\ldots (2.12)$$

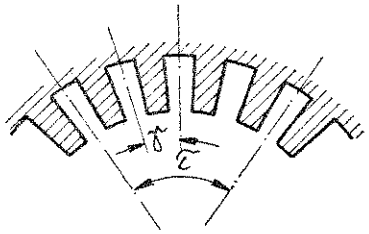
i ukupni broj provodnika svih faza statora

$$qN=2pqmN_u=ZN_u \qquad \ldots\ldots (2.13)$$

Napokon, lučno rastojanje između osa dva susjedna utora (odgovara jednom utoru i jednom zupcu) naziva se *utorski korak* γ (sl. 2.12). On se može izraziti električnim stepenima, ali je praksa pokazala da ga je bolje staviti u odnos prema polnom koraku izraženom brojem utora. Tako dobivamo:

$$z\gamma=\tau=\frac{\lambda}{2}, \text{ odnosno}$$

$$\gamma=\frac{\tau}{z}=\frac{\lambda}{2z} \qquad \ldots\ldots (2.14)$$



Sl. 2.12. Utorski korak γ

Svaki fazni namotaj pod svakim polom ima svoje mjesto. To mjesto namijenjeno smještaju strana svitaka jedne faze pod jednim polom zovemo *pojas s*. Dobivamo ga množenjem broja utora po polu i po fazi m sa utorskim korakom γ. Dakle:

$$s=m\gamma=\frac{z}{q}\,\frac{\tau}{z}=\frac{\tau}{q} \qquad \ldots\ldots (2.15)$$

2.1.4. **Elementi, vrste i prikazivanje namotaja**

Prema broju faza, namotaje mašina naizmjenične struje dijelimo na: *jednofazne, dvofazne, trofazne* i *višefazne*.

Namotaj je jednofazan ako je cijela mašina građena za rad na jednoj fazi (jednofazni asinhroni motor). U tom slučaju stator ima namotaj samo jedne faze, pri čemu svi utori ne moraju biti ispunjeni.

Dvofazni namotaj se vrlo rijetko upotrebljava.

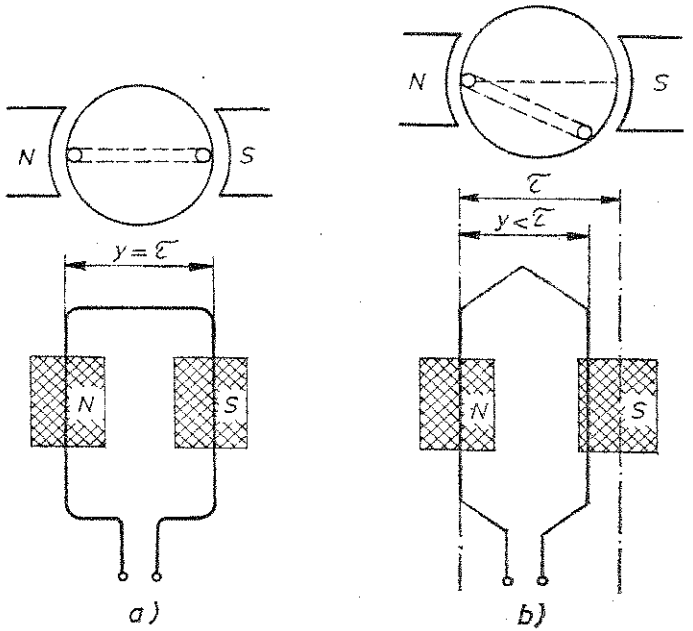
Za nas praktični značaj imaju samo trofazni namotaji. Vrlo široko se primjenjuju, pogotovu kod sinhronih generatora. Izrada im je vrlo složena. Najviše pažnje ćemo njima posvetiti.

Namotaji sa više od tri faze izrađuju se rijetko, i to samo za specijalne svrhe.

Prema širini svitka, odnosno veličini navojnog koraka, namotaji mogu biti *dijametralni* i *tetivni*.

Za namotaj kažemo da je dijametralni kada mu je navojni korak jednak polnom ($y=\tau$), a *tetivni (namotaj sa skraćenim korakom) je onaj čiji je navojni korak manji od polnog ($y<\tau$)*, kako je prikazano na sl. 2.13.

Nazivi „dijametralni" i „tetivni" primjenjivi su samo za dvopolne mašine. Naime, ako je $y=\tau$, utori koji pripadaju svitku nalaze se na krajevima dijametra, a ako je $y<\tau$, utori se nalaze na krajevima tetive. Ovi nazivi, zbog simbolike, osta-



Sl. 2.13. Prikaz dijametralnog i tetivnog namotaja: a) svitak s dijametralnim (punim) navojnim korakom ($y=\tau$), b) svitak s tetivnim (skraćenim) navojnim korakom ($y<\tau$).

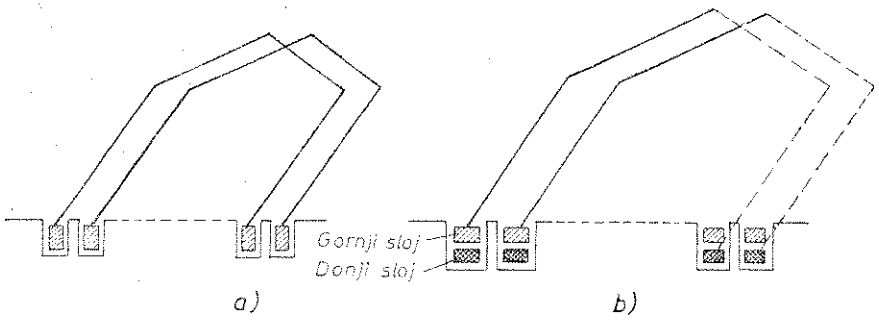
li su i kod višepolnih mašina. Namotaji s dijametralnim korakom rijeđe se upotrebljavaju. Većina statorskih namotaja izraduju se sa skraćenim navojnim korakom (imaju dobre električne osobine, a ušteda je na bakru provodnika).

Prema broju strana svitaka u utoru i načinu njihovog smještanja, namotaje dijelimo na *jednoslojne* i *dvoslojne*.

Naziv jednoslojni dolazi od toga što se u svaki utor smješta samo jedna strana svitka, tj. jedan sloj, dok se kod dvoslojnog namotaja u svaki utor stavljaju po dvije strane svitka, odnosno dva sloja od dva različita svitka, kako je predstavljeno na sl. 2.14.

Nije teško zaključiti da je ukupni broj svitaka kod jednoslojnog namotaja jednak polovini broja utora, a kod dvoslojnog namotaja je onoliki broj svitaka koliki je broj utora. Još da kažemo da je kod dvoslojnog namotaja jedna strana svitka smještena u gornji sloj utora, a druga obavezno u donji sloj (sl. 2.14b).

Prema obliku svitaka, namotaje dijelimo na: *namotaje sa svicima jednakog oblika i namotaje sa svicima nejednakog (različitog) oblika*.



Sl. 2.14. a) Jednoslojni namotaj, b) dvoslojni namotaj.

Kako spajamo svitke, namotaje dijelimo na *valovite* i *petljaste*.

I konačno, prema vrsti pojasa, odnosno prema broju utora po polu i po fazi, namotaje dijelimo na:

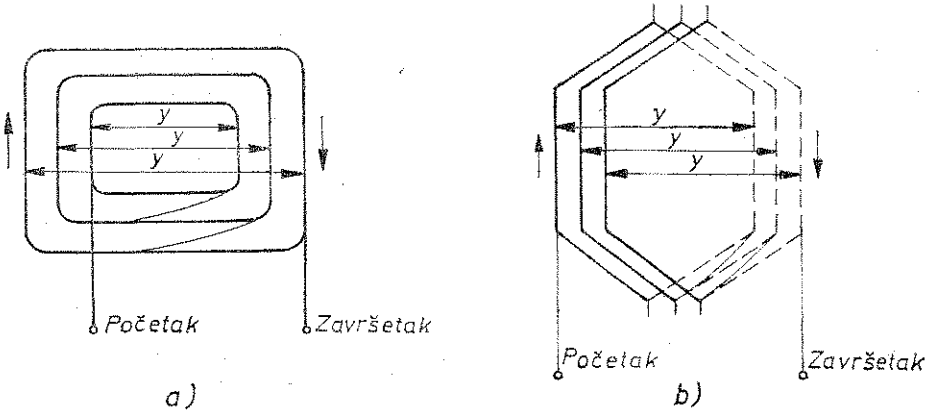
— *namotaje sa odijeljenim pojasevima, odnosno sa cijelim brojem utora po polu i po fazi* i

— *namotaje sa miješovitim pojasevima, odnosno sa razlomljenim brojem utora po polu i po fazi.*

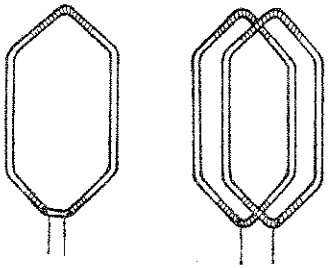
Prije nego što predemo na detaljna objašnjenja ove posljednje podjele, moramo naučiti još neke pojmove.

Polno-fazna grupa ili grupa svitaka. Ovisno o broju utora Z na statoru ili rotoru, o broju polova $2p$ i o broju faza q, nekoliko svitaka možemo spojiti jedan sa drugim da sačinjavaju polno-faznu grupu. Na sl. 2.15. predstavljena je polno-fazna grupa koncentričnog i petljastog namotaja.

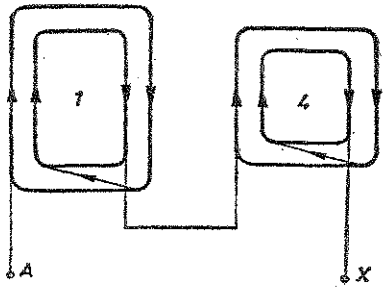
Izrada polno-fazne grupe, isto kao i svitaka, vrši se na šablonu, a da se ne prekida provodnik među pojedinim svicima. Šablona se sastoji od toliko elemenata



Sl. 2.15. Shematski prikaz polno-fazne grupe: a) koncentrični namotaj, b) petljasti namotaj.



Sl. 2.16. Vanjski izgled polno-fazne grupe dvoslojnog petljastog namotaja sastavljene od jednog i dva svitka



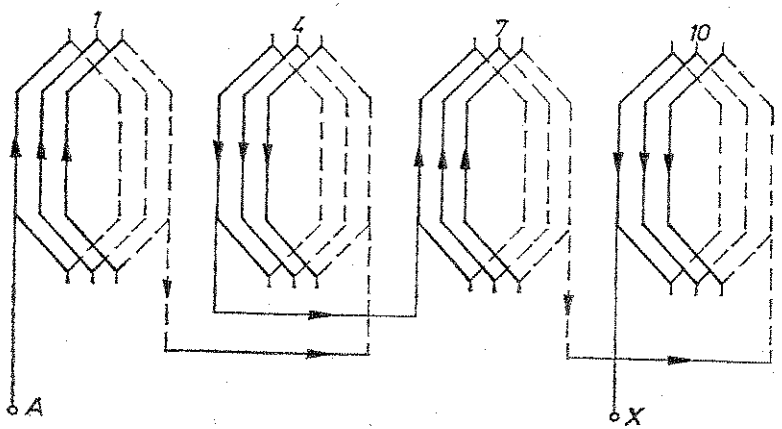
Sl. 2.17. Fazna grupa 4-polnog jednoslojnog koncentričnog namotaja

od koliko se svitaka sastoji polno-fazna grupa. Opšti izgled polne fazne grupe za dvoslojni petljasti namotaj prikazan je na sl. 2.16.

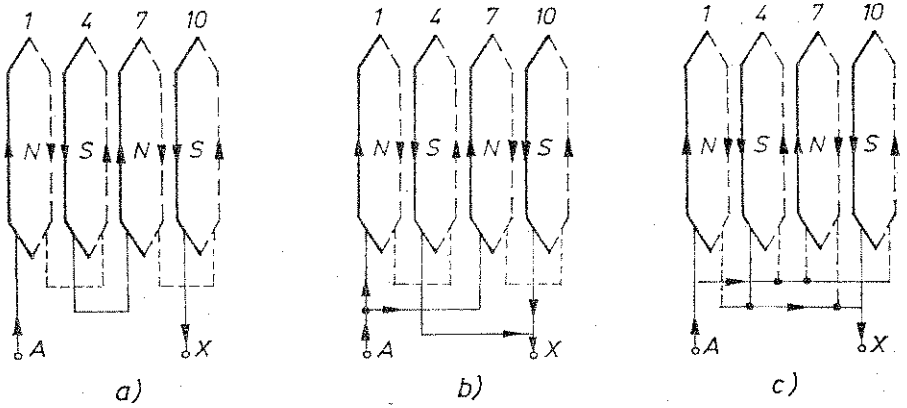
Fazna grupa. Jedna polno-fazna grupa ili više njih u fazi sačinjavaju faznu grupu. Broj polno-faznih grupa u fazi u jednoslojnom namotaju jednak je broju polova p, a u dvoslojnom petljastom namotaju broju polova $2p$.

Tako, ako četvoropolni jednoslojni namotaj predstavljen na sl. 2.17. ima dvije polno-fazne grupe u fazi ($p=2$), onda će četveropolni dvoslojni namotaj imati četiri polno-fazne grupe u fazi ($2p=4$), kako je prikazano na sl. 2.18.

Spajanje polno-faznih grupa u fazne grupe za obje vrste namotaja (jednoslojnih i dvoslojnih) može biti serijsko, paralelno i kombinovano. Na sl. 2.19. prikazane su sve tri vrste spajanja polno-faznih grupa dvoslojnog petljastog namotaja. Serijsko i paralelno spajanje polno-faznih grupa jednoslojnog koncentričnog namotaja predstavljeno je na sl. 2.20.



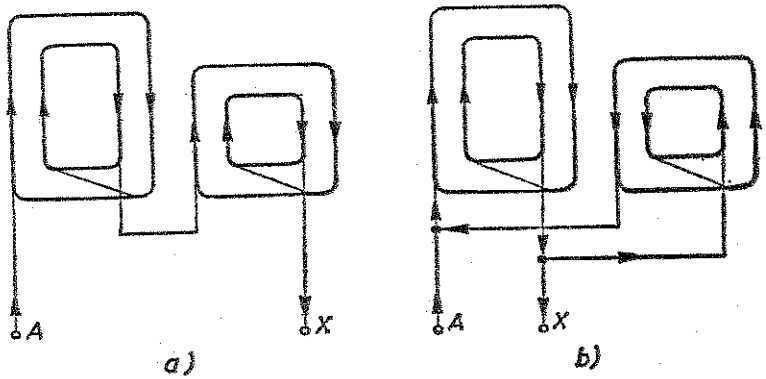
Sl. 2.18. Fazna grupa 4-polnog dvoslojnog petljastog namotaja



Sl. 2.19. Načini spajanja polno-faznih grupa dvoslojnog petljastog namotaja: a) serijsko spajanje, b) paralelno spajanje, c) kombinovano (mješovito) spajanje.

Paralelne grane. Paralelna grana u fazi označava se sa a predstavlja element sastavljen od nekoliko polno-faznih grupa spojenih u seriju. Faza se može sastojati od jedne, dvije, tri i više paralelnih grana. Najveći mogući broj paralelnih grana dvoslojnog namotaja jednak je broju polova $2p$, a najveći mogući broj paralelnih grana jednoslojnog namotaja jednak je broju pari polova p. Zaključujemo: bilo koji namotaj ne može da ima proizvoljan broj paralelnih grana. Kod dvoslojnih namotaja sa cijelim brojem utora po polu i po fazi broj paralelnih grana određujemo izrazom:

$$a=\frac{2p}{n}=\text{cijeli broj} \qquad \ldots\ldots \quad (2.16)$$



Sl. 2.20. Načini spajanja polno-faznih grupa jednoslojnog koncentričnog namotaja: a) serijsko spajanje, b) paralelno spajanje.

gdje je n prirodan broj ($n=1, 2, 3\ldots$).

Npr. četveropolni dvoslojni namotaj ($2p=4$), primjenjujući izraz (2.16), može imati $a=4$; $a=2$ i $a=1$ paralelna grana.

Kod jednoslojnih namotaja sa cijelim brojem utora po polu i po fazi broj paralelnih grana određujemo izrazom:

$$a=\frac{p}{n}=\text{cijeli broj} \qquad \ldots\ldots \quad (2.17)$$

Za isti primjer četveropolni jednoslojni namotaj ($p=4$), primjenjujući izraz (2.17), imaće $a=2$ i $a=1$ paralelna grana. Vidljivo je da je broj mogućih paralelnih grana kod jednoslojnih namotaja dva puta manji nego kod dvoslojnih za isti primjer.

Iz svega ovoga sa čime smo se upoznali nije teško zaključiti da ćemo kompletne namotaje mašina naizmjenične struje predstavljati shemama. Postoje dvije vrste shema. To su *kružna (čeona)* i *razvijena*. Najčešće primjenjujemo razvijenu shemu koja je preglednija naročito kod dvoslojnih namotaja.

Kružnom shemom namotaji statora predstavljeni su onako kako leže u utorima kada se stator gleda sa čela (sprijeda).

Razvijenu shemu dobijamo zamišljenim presijecanjem statora dužinom jednog zuba i razvijanjem u ravninu. Utore prikazujemo okomitim linijama koje su označene arapskim brojevima 1, 2, 3... itd. Kod jednoslojnih namotaja utor je označen jednom punom linijom, koja ujedno označava i stranu svitka smještenu u utor. Kod dvoslojnih namotaja shematski prikaz će biti nešto složeniji jer će se u utoru naći dvije strane svitka. Zato utor kod ovih namotaja označavamo sa dvije linije (jedna uz drugu) od kojih je jedna puna (obično lijeva) i označava stranu svitka koja je smještena u gornji sloj utora, a druga (sada već desna) isprekidana i označava stranu svitka smještenu u donji sloj utora.

2.1.5. **Namotaji s odjeljenim pojasevima (s cijelim brojem utora po polu i po fazi)**

Kod ovih namotaja pojas je odjeljen. To znači, da su svi utori i sve strane svitaka u njima jedan pored drugog i da pripadaju istoj fazi. Prema tome, pojasu pripada cijeli broj utora m.

Primjerima ćemo pokazati kako se izvodi ova vrsta namotaja.

Primjer 1

Nacrtajmo razvijenu shemu trofaznog jednoslojnog koncentričnog namotaja sa svicima jednakog oblika. Zadati su sljedeći podaci: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y=\tau$.

Rješenje:

Prije nego što pređemo na crtanje razvijene sheme namotaja moramo izračunati osnovne podatke na osnovu kojih ćemo obrazovati namotaj. Svakom paru polova, odnosno dvostrukom polnom koraku pripada:

$$\lambda=\frac{Z}{p}=\frac{24}{2}=12 \text{ utora.}$$

Svakom polu pripada:

$$z=\frac{Z}{2p}=\frac{24}{4}=6 \text{ utora.}$$

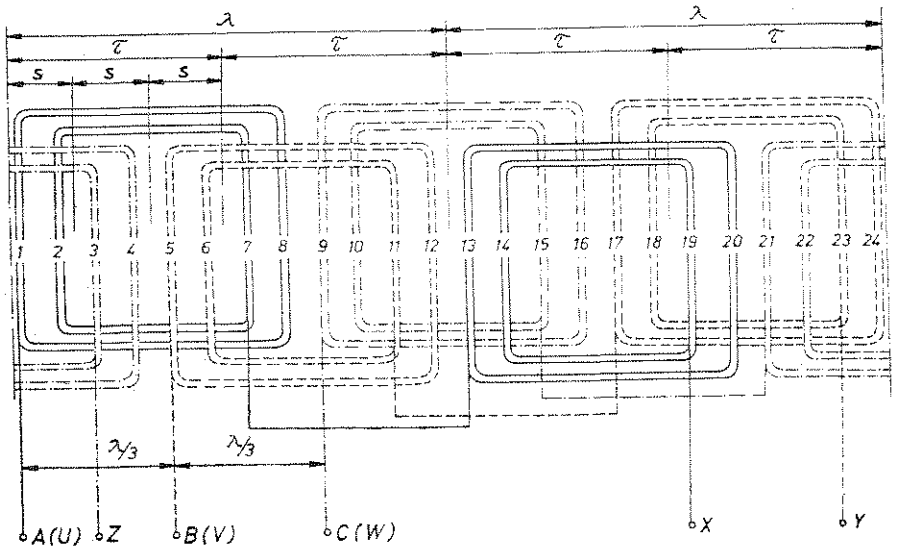
Svakom polu i fazi, odnosno jednom pojasu pripada:

$$m=\frac{Z}{2pq}=\frac{24}{12}=2 \text{ utora.}$$

To znači da se grupa svitaka sastoji od dva svitka. Uzimamo da je navojni korak jednak polnom koraku, tj. $y=\tau$. U našem primjeru $y=6$ utora.

Polno-faznih grupa u našem primjeru ima $pq=2\cdot 3=6$ svitaka. To znači da svakoj fazi pripadaju po dvije $(6/3=2)$ grupe svitaka.

Sada pristupamo crtanju razvijene sheme. Počinjemo od prve faze: u utore 1 i 2 smještamo lijeve strane prve grupe svitaka, a desne u utore 7 i 8. Utori 1 i 2 udaljeni su od utora 7 i 8 za navojni korak $y=6$ (brojimo od prvog ili drugog utora: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6). Kod jednoslojnih namotaja sa dijametralnim navojnim korakom rastojanje između susjednih grupa svitaka jedne faze jednako je dvostrukom polnom koraku, pa će druga grupa svitaka prve faze zauzimati 13. i 14, te 19. i 20. utor. Da provjerimo: pošto je dvostruki polni korak $\lambda=12$ utora, brojimo od utora 1 i 2 (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) i tako dolazimo do utora 13 i 14. Ove dvije grupe svitaka spajamo u seriju. Tako je obrazovana prva faza. Njezin početak (ulaz) označavamo sa $A\,(U)$, a završetak (izlaz) sa X.



Sl. 2.21. Razvijena shema trofaznog jednoslojnog koncentričnog namotaja: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y=\tau=6$, $m=2$

Prije nego što počnemo obrazovati drugu i treću fazu, moramo odrediti njihove početke. Zapamti: početak prve faze udaljen je od početka druge faze za trećinu dvostrukog polnog koraka izraženog u utorima, tj. $\lambda/3=12/3=4$. Ista je udaljenost između početaka druge i početka treće faze. Znači, da bismo dobili početak druge i treće faze, brojimo od početka prve faze (0, 1, 2, 3, 4), pa ustanovljujemo da je početak druge faze u utoru 5. Dalje brojimo od utora 5 (0, 1, 2, 3, 4) ustanovljujemo početak treće faze. On se nalazi u utoru 9.

Koristeći se svim ovim što smo do sada ustanovili, pa i određenim navojnim korakom, obrazujemo (crtamo) drugu fazu. Nije teško zaključiti da će prva grupa svitaka druge faze biti smještena u utorima 5, 6 i 11, 12, a druga grupa u utorima 17, 18 i 23, 24. Ove dvije grupe svitaka spajamo u seriju i tako je obrazovana druga faza sa početkom u utoru 5 i oznakom $B\,(V)$ i završetkom u utoru 23 i oznakom Y, kako je prikazano na sl. 2.21.

Za vježbu obrazuj treću fazu!

Pri obrazovanju namotaja na ovaj način, indukovani naponi koji pripadaju jednoj fazi biće istog smjera, pa dolazi do sabiranja. Upotrebljavaju se za statore sinhronih mašina manjih snaga.

Primjer 2

Nacrtajmo razvijenu shemu trofaznog jednoslojnog koncentričnog namotaja sa svicima nejednakog oblika. Zadati su sljedeći podaci: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y_{sr}=\tau$.

Rješenje

Dvostruki polni korak izražen u utorima je:

$$\lambda=\frac{Z}{p}=\frac{24}{2}=12.$$

Polni korak izražen u utorima je:

$$\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{24}{4}=6.$$

Broj utora po polu i po fazi je:

$$m=\frac{Z}{2pq}=\frac{24}{12}=2.$$

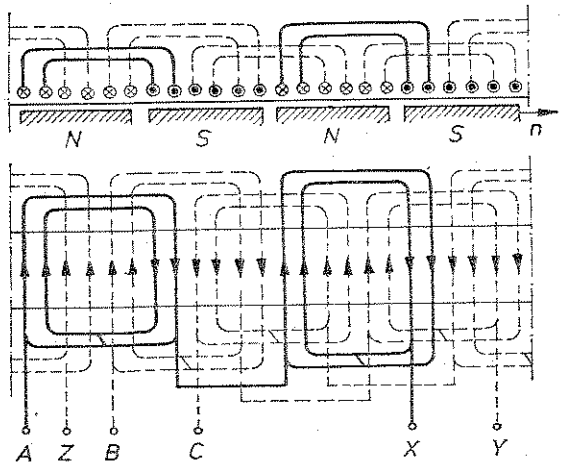
To znači da se grupa svitaka sastoji od dva svitka. Polno-faznih grupa za ovaj primjer ima $pq=2\cdot 3=6$ svitaka. To znači da svakoj fazi pripadaju po dvije $(6/3=2)$ grupe svitaka, a u svakoj grupi imamo dva svitka nejednake širine. Ako je navojni korak užeg svitka $y_1=5$, a šireg $y_2=7$, srednji navojni korak y_{sr} biće:

$$y_{sr}=\frac{y_1+y_2}{2}=\frac{5+7}{2}=\frac{12}{2}=6 \text{ utora.}$$

Počeci faza su:

$$\frac{\lambda}{q}=\frac{12}{3}=4 \text{ utora.}$$

Namotaj se sastoji od svitaka s dva različita oblika. Dijelovi svitaka koji se nalaze van utora u ovom primjeru povijeni su u dvije ravni, odnosno dvije etaže i zauzimaju malo prostora. Upotrebljavaju se za statore sinhronih i asinhronih mašina. Nedostatak ovog namotaja je u tome što pri izradi napredujemo po obimu uvijek u istom smjeru, pa dobijemo stator koji nije podijeljen na dijelove. To kod velikih sinhronih generatora koji se grade iz više dijelova (radi praktičnosti i transporta) predstavlja veliku manu. Ukoliko polno-fazne grupe spojimo paralelno (svici su nejednakih dimenzija), dolazi do toga da kroz njih teku nejednake struje zbog različitih aktivnih i induktivnih otpora. Na sl. 2.22. prikazana je razvijena shema ovog namotaja.



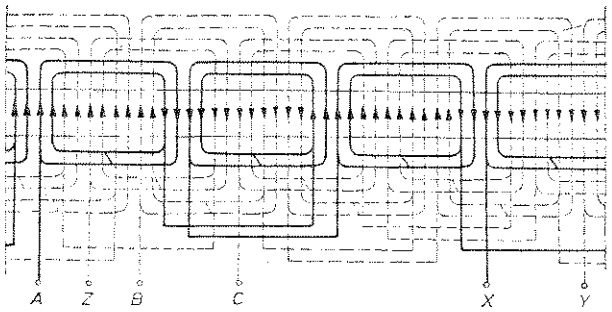
Sl. 2.22. Razvijena shema trofaznog jednoslojnog koncentričnog namotaja sa svicima različitog oblika čije su bočne strane povijene u dvije ravni (etaže): $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y_{sr}=6$, $m=2$

Primjer 3

Na osnovu nacrtane razvijene sheme trofaznog jednoslojnog koncentričnog namotaja sa svicima nejednakog oblika (sl. 2.23) utvrdi sljedeće podatke:

- broj utora koji pripada dvostrukom polnom koraku, polnom koraku i pojasu,
- odredi broj svitaka koji pripadaju jednoj grupi,
- odredi broj polno-faznih grupa,
- odredi navojni korak.

Sa slike 2.23. uočljivo je da pod svakim parom polova namotaji sve tri faze obrazuju simetričnu cjelinu. Ovo nam omogućuje da se pri izradi namotaja stator podijeli na više dijelova, izvrši namatanje i tako transportuje. Sa slike se vidi da se namotaj sastoji od svitaka sa šest različitih oblika čije su bočne strane povijene u tri ravni (etaže), pa je na taj način izbjegnuto ukrštavanje.



Sl. 2.23. Razvijena shema trofaznog jednoslojnog koncentričnog namotaja sa svicima različitog oblika čije su bočne strane povijene u tri ravni (etaže)

Primjer 4

Nacrtajmo razvijenu shemu trofaznog jednoslojnog petljastog namotaja sa svicima jednakog oblika. Zadati su sljedeći podaci: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y=\tau$.

Rješenje

Dvostruki polni korak:

$$\lambda=\frac{Z}{p}=\frac{24}{2}=12 \text{ utora}$$

Polni korak:

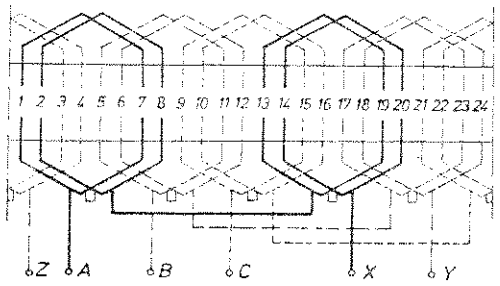
$$\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{24}{4}=6 \text{ utora}$$

Broj utora po polu i po fazi:

$$m=\frac{Z}{2pq}=\frac{24}{12}=2 \text{ utora}$$

To znači da se grupa svitaka sastoji od dva svitka.
Navojni korak:

$$y=\tau=z=6 \text{ utora}$$



Sl. 2.24. Razvijena shema trofaznog jednoslojnog petljastog namotaja sa svicima jednakog oblika: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y=\tau=6$, $m=2$

Polno-fazna grupa za ovaj primjer je $pq=2\cdot 3=6$ svitaka. To znači da svakoj fazi pripadaju po dvije $(6/3=2)$ grupe svitaka. Počeci pojedinih faza su:

$$\frac{\lambda}{q}=\frac{12}{3}=4 \text{ utora}$$

Na osnovu izračunatih podataka nacrtana je razvijena shema ovog namotaja na sl. 2.24. Ovakvi namotaji sa svicima jednakog oblika upotrebljavaju se za statore asinhronih i sinhronih mašina čije su snage male.

Primjeri za vježbu

Primjer 1

Nacrtaj razvijenu shemu trofaznog jednoslojnog koncentričnog namotaja s svicima različitog oblika čije su bočne strane povijene u dvije ravni (etaže). Zadati podaci su: $Z=36$, $p=2$, $q=3$, $y=\tau=9$.

Primjer 2

Nacrtaj razvijenu shemu trofaznog jednoslojnog petljastog namotaja s svicima jednakog oblika. Zadati podaci su: $Z=36$, $p=3$, $q=3$, $y=\tau=6$.

Do sada smo govorili o trofaznim jednoslojnim koncentričnim namotajima sastavljenim od svitaka jednakih i različitih širina i dužina, kao i o trofaznim jednoslojnim namotajima sa svicima jednakog oblika.

Na jednom primjeru pokazaćemo kako se izvodi trofazni dvoslojni petljasti namotaj s dijametralnim navojnim korakom. Zadati podaci su: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y=\tau=6$.

Rješenje

Pošto se kod dvoslojnog namotaja u utor stavljaju dvije strane dva različita svitka, nije teško zaključiti da će u našem primjeru biti ukupno 24 svitka.

Dvostruki polni korak je:

$$\lambda=\frac{Z}{p}=\frac{24}{2}=12 \text{ utora}$$

Polni korak je:

$$\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{24}{4}=6 \text{ utora}$$

Svakom polu i fazi pripada:

$$m=\frac{Z}{2pq}=\frac{24}{12}=2 \text{ utora}$$

To znači da se grupa svitaka sastoji od dva svitka.

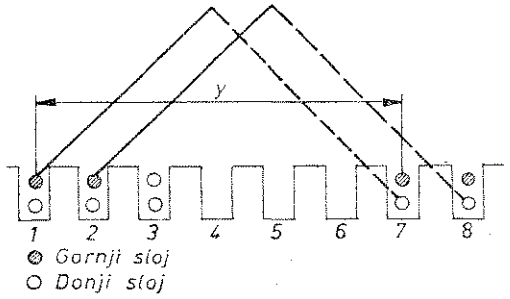
Već smo kazali da je navojni korak jednak polnom, tj. $y=\tau=6$ utora.

Broj polno-faznih grupa razlikuje se kod jednoslojnih namotaja i jednak je broju polova pomnoženom s brojem faza, tj. $2pq=2\cdot2\cdot3=12$ svitaka. To znači da svakoj fazi pripadaju po četiri $(12/3=4)$ grupe svitaka.

Polno-fazne grupe se izrađuju na prethodno napravljenom šablonu, sastavljenom od toliko odvojenih jednakih elemenata od koliko svitaka se sastoji. U našem primjeru ih je 8.

Ulazne strane svitaka i polno-faznih grupa kod dvoslojnog petljastog namotaja smještaju se u gornje polovine utora, a izlazne u donje polovine utora koji su udaljeni za navojni korak u našem primjeru $y=6$, kako je predstavljeno na sl. 2.25.

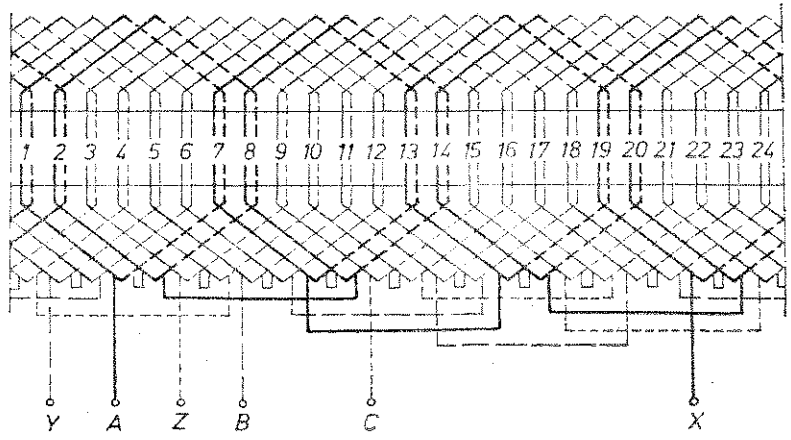
Pošto smo naučili neke nove pojmove za dvoslojne petljaste namotaje, pristupamo crtanju razvijene sheme prema kojoj grupe svitaka stavljamo u utore, formiramo i spajamo polno-fazne grupe i konačno formiramo cijeli namotaj.



Sl. 2.25. Predstavljanje rasporeda strana svitaka u utorima kod dvoslojnog namotaja

Počinjemo formirati prvu fazu:
U gornje slojeve utora 1 i 2 smještamo lijeve strane prve grupe svitaka, a desne u donje slojeve utora 7 i 8. Kod dvoslojnih namotaja sa cijelim brojem utora po polu i fazi u našem primjeru $(m=2)$ rastojanje između početaka dvije susjedne grupe svitaka jedne faze jednako je navojnom koraku u našem primjeru $y=6$ utora (brojimo od 7 i 8 utora: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6). Prema tome, u gornje slojeve utora 7 i 8 smještamo lijeve strane druge grupe svitaka, a desne u donje slojeve utora 13 i 14. Koristeći se ovim što smo naučili, u gornje slojeve utora 13 i 14 smještamo lijeve strane treće grupe svitaka, a desne u donje slojeve utora 19 i 20. I na koncu, u utore 19 i 20 smještamo lijeve strane četvrte (posljednje) grupe svitaka prve faze, a desne smještamo u donje slojeve utora 1 i 2. Spajajući grupe svitaka u seriju, završili smo namotaj prve faze, čiji je početak (ulaz) u utoru 1 sa oznakom A (U), a završetak u utoru 19 sa oznakom X (vidi sliku 2.26).

Početak prve faze udaljen je od druge, a početak druge od treće za, kako smo već naučili, trećinu dvostrukog polnog koraka izraženog u utorima, tj. $\lambda/3=12/3=4$.



Sl. 2.26. Razvijena shema trofaznog dvoslojnog petljastog namotaja s dijametralnim navojnim korakom: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y=\tau=6$, $m=2$

Znači, da bismo dobili početak druge faze, brojimo od početka prve faze (0, 1, 2, 3, 4) pa ustanovljujemo da je početak druge faze u utoru 5. Dalje brojimo od utora 5 (0, 1, 2, 3, 4) i ustanovljujemo početak treće faze u utoru 9.

Za vježbu nacrtaj ostale dvije faze, poveži grupe svitaka i odredi početke i završetke faznih namotaja. Vidimo da se na ovaj način dobija namotaj sa odijeljenim pojasevima. Pojasu svake faze pod svakim polom pripada cijeli broj utora u našem primjeru dva utora.

Primjeri za vježbu

Primjer 3

Nacrtaj razvijenu shemu trofaznog dvoslojnog petljastog namotaja s dijametralnim navojnim korakom. Zadati podaci su: $Z=36$, $p=3$, $q=3$, $y=\tau$.

2.1.6. **Namotaji s mješovitim pojasevima (s razlomljenim brojem utora po polu i po fazi)**

Kod ovih namotaja pojas je mješovit. Nastaje pri skraćenom navojnom koraku, manjim od polnog ($y<\tau$). To znači, pojasu svake faze pod svakim polom pripada jedan cijeli utor i po polovina susjednog utora. Druge polovine susjednih utora pripadaju drugim fazama. Prema tome, pojasevi pojedinih faza nisu odijeljeni (preklapaju se), odnosno pojasu pripada razlomljeni broj utora m.

Prednost namotaja sa mješovitim pojasevima u odnosu na namotaje sa odijeljenim pojasevima je u tome što se sa skraćenjem navojnog koraka smanjuje uticaj viših harmonika na koje se dijele njihovi magnetni napon i magnetni tok.

Na sl. 2.27. predstavljena je razvijena shema trofaznog dvoslojnog petljastog namotaja sa skraćenim navojnim korakom. Zadati podaci su: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y<\tau=5$.

Rješenje

Dvostruki polni korak je:

$$\lambda=\frac{Z}{p}=\frac{24}{2}=12 \text{ utora}$$

Polni korak je:

$$\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{24}{4}=6 \text{ utora}$$

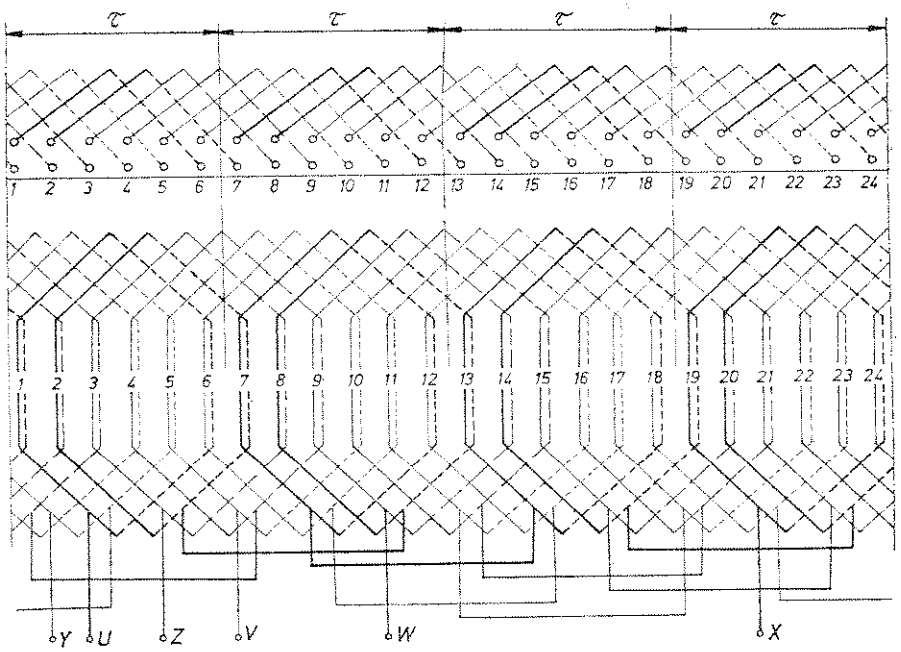
Svakom polu i fazi pripada:

$$m=\frac{Z}{2pq}=\frac{24}{12}=2 \text{ utora}$$

To znači da se grupa svitaka sastoji od dva svitka.

Već smo kazali da je navojni korak manji od polnog, tj. $y<\tau=5$ utora.

Broj polno-faznih grupa jednak je broju polova pomnoženom s brojem faza, tj. $2pq=2\cdot2\cdot3=12$ svitaka. To znači da svakoj fazi pripadaju po četiri ($12/3=4$) grupe svitaka.



Sl. 2.27. Razvijena shema trofaznog dvoslojnog petljastog namotaja sa skraćenim navojnim korakom: $Z=24$, $p=2$, $q=3$, $y<\tau$, $y=5$, $m=2$

Kod dvoslojnih namotaja sa razlomljenim brojem utora po polu i po fazi rastojanje između početaka dvije susjedne grupe svitaka jedne faze jednako je dijametralnom (polnom) koraku, u našem primjeru $\tau=6$ utora (brojimo od 6 i 7 utora: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6).

Razmaci između početaka faza nalaze se na rastojanju trećine dvostrukog polnog koraka izraženog u utorima, u našem primjeru $\tau/3=12/3=4$ utora.

Za vježbu

Pošto je razvijena shema već nacrtana, provjeri tačnost izračunatih vrijednosti i uporedi ovu razvijenu shemu sa prethodnom, u kojoj je navojni korak jednak polnom.

Primjeri za vježbu

Primjer 4

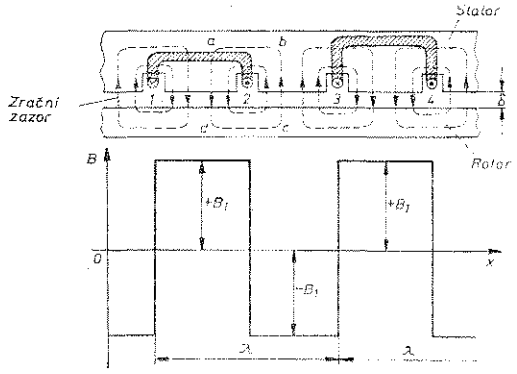
Nacrtaj razvijenu shemu trofaznog dvoslojnog petljastog namotaja sa skraćenim navojnim korakom. Zadati podaci su: $Z=36$, $p=2$, $q=3$, $y<\tau=8$.

Primjer 5

Nacrtaj razvijenu shemu trofaznog dvoslojnog petljastog namotaja sa skraćenim navojnim korakom. Zadati podaci su: $Z=36$, $p=3$, $q=3$, $y<\tau=5$.

2.1.7. **Magnetni tok namotaja jedne faze**

Da bismo dobili magnetski tok jedne faze, radi jednostavnosti, posmatraćemo slučaj kada pod parom polova svakoj fazi pripada samo jedan svitak, kako je prikazano na sl. 2.28. Navojni korak jednak je polnom ($y=\tau$). Na slici je prikazano kako su svici prve faze smješteni u utore i kako su međusobno povezani.



Sl. 2.28. Magnetska indukcija namotaja jedne faze ($m=1$)

Analiziramo momenat kada kroz namotaj prve faze teče naizmjenična struja maksimalne vrijednosti. Ako efektivnu vrijednost naizmjenične struje označimo sa I_{ef}, a maksimalnu sa I_m, dobivamo da je $I_m=\sqrt{2}I_{ef}$. Maksimalna vrijednost struje oko svitka sa N navoja stvara magnetni napon I_mN_u, koji u zračnom zazoru debljine δ obrazuje magnetski tok Φ. Veličina tog magnetskog toka zavisi, osim od veličine magnetnog napona, još i od ukupnog magnetskog otpora magnetskog kola. Smjer magnetskog toka za označene smjerove struje u svicima određujemo Amperovim pravilom. Vidimo da su u određenom momentu silnice magnetskih tokova između utora 1 i 2 usmjerene prema dolje, a između utora 2 i 3 njihov smjer će biti suprotan, tj. biće usmjerene prema gore.

Izraz za magnetsku indukciju B_1 dobićemo na taj način što ćemo posmatrati zamišljenu cijev magnetskog toka *abcd* čiji je presjek S u zračnom zazoru i čiji magnetski tok iznosi $\Phi=B_1S$. Ako broj provodnika u jednom utoru označimo sa N_u, obrazac za magnetski napon koji je obuhvaćen sa posmatranom cijevi biće:

$$M_1=I_mN_u=\sqrt{2}I_{ef}N_u \qquad \ldots\ldots (2.18)$$

Magnetski tok posmatrane cijevi, kako se sa slike vidi, prolazi kroz željezno jezgro statora, prolazi kroz zračni zazor, ulazi u željezno jezgro rotora, ponovo prolazi kroz zračni zazor i vraća se u željezno jezgro statora. Nije teško zaključiti da će od ukupnog magnetskog otpora biti najveći u zračnom zazoru. O manjem dijelu magnetskog otpora u željeznom jezgru vodimo računa na taj način što umjesto stvarnog zračnog zazora δ posmatramo veći (ekvivalentni) zračni zazor δ', tako da magnetski otpor u njemu bude jednak sa otporom cijelog magnetskog kola.

$$R_M=\frac{2\delta'}{\mu_0 S}$$

Koristeći Kap-Hopkinsonov zakon, magnetski tok Φ u posmatranom krugu biće:

$$\Phi=B_1S=\frac{M_1}{R_M}=\frac{\sqrt{2}I_{ef}N_u}{\frac{2\delta'}{\mu_0 S}}=\mu_0\frac{\sqrt{2}I_{ef}N_u}{2\delta'}S.$$

Odatle dobivamo izraz za magnetsku indukciju:

$$B_1=\mu_0\frac{\sqrt{2}I_{ef}N_u}{2\delta'} \qquad \ldots\ldots (2.19)$$

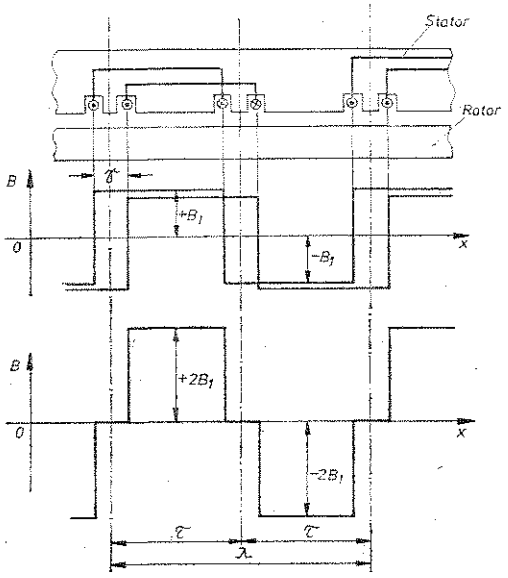
Prema tome, bez obzira koju cijev magnetskog toka posmatramo, magnetska indukcija ima istu vrijednost u svakoj tački zračnog zazora od utora 1 do utora 2, a u zračnom zazoru između utora 2 i 3 njena vrijednost ostala je ista ali suprotnog smjera. Sa sl. 2.28b. se vidi da je magnetska indukcija prve faze naizmjenična neharmonična funkcija, koja je predstavljena naizmjenično pozitivnim i negativnim pravougaonicima čije su osnovice jednake polnom koraku τ, a visine naizmjenične $+B_1$ i $-B_1$.

Ovakva neharmonična pravougaona funkcija čija je valna dužina λ može se rastaviti na veliki broj sinusoida (harmonika), od kojih samo prva ima valnu dužinu λ, dok su sve ostale manje od λ. Prva sinusoida naziva se osnovna (prvi harmonik), dok se ostale zovu harmonici višeg reda. Valna dužina osnovnog vala, kako se još naziva prvi harmonik, je λ, a njegova amplituda je:

$$Y_1=\frac{4}{\pi}B_1=1{,}275B_1 \qquad \ldots\ldots (2.20)$$

Vidimo da je amplituda osnovnog vala za 1,275 puta veća od visine neharmonične funkcije B_1.

Posmatrajmo sada jednoslojni trofazni namotaj sa dva utora po polu i po fazi, tj. dva svitka po paru polova i po fazi koji su jedan od drugog udaljeni za utorski korak γ, kako je prikazano na sl. 2.29. Svaki svitak stvoriće u zračnom zazoru po jedan nepokretan naizmjenični magnetski tok, čija je jačina (magnetska indukcija B_1) data izrazom (2.19) u momentu kada kroz njega teče struja maksimalne vrijednosti. Ova dva magnetska toka, odnosno njihove magnetske indukcije predstavljene su dvjema istim naizmjenično pravougaonim funkcijama koje su međusobno udaljene za utorski korak γ. Ovi magnetski tokovi u zračnom zazoru se sabiraju i čine rezultantni magnetski tok prve faze, čija je magnetska indukcija naizmjenično stepenasta funkcija lučnih apscisa x



Sl. 2.29. Magnetska indukcija namotaja jedne faze ($m=2$)

širom zračnog zazora. Njena valna dužina je λ, a amplituda ima dvostruku vrijednost, tj. iznosi $2B_1$, kako je prikazano na sl. 2.29 b.

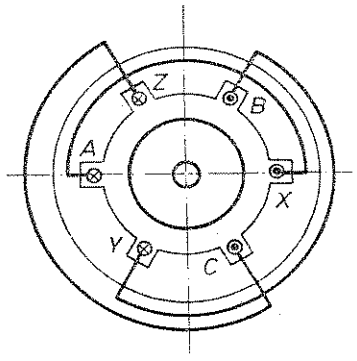
Uopšte, ako se fazni namotaj sastoji od m svitaka po paru polova, amplitudna vrijednost stepenaste funkcije, kojom se magnetska indukcija faze predstavlja, biće m puta veća, tj. mB_1.

* * * * * * * * *

2.1.8. **Obrtno magnetno polje**

Raspodjela magnetskog polja dužinom oboda statora neće biti sinusoidalna, ali kako smo već ustanovili, radi jednostavnosti, bavićemo se samo prvim harmoničnim članovima i ta polja ćemo predstavljati sinusoidalnim, imajući na umu da se zapravo radi samo o prvom harmoničnom članu, odnosno osnovnom valu.

Uzimamo najjednostavniji slučaj da statorski pobudni namotaj čini jedan svitak. Propuštajući kroz njega naizmjeničnu struju koja se vremenski sinusoidalno mijenja, ona će svojim magnetskim naponom stvoriti magnetsko polje indukcije B, ali vremenski promjenljivo kao što je i ona. Na ovakav način stvorena magnetska indukcija biće dužinom oboda statora ne samo prostorno promjenljiva nego i vremenski. Takvo magnetsko polje koje je prostorno i vremenski promjenljivo nazivamo pulzirajuće magnetsko polje.



Sl. 2.30. Stator sa tri fazna namotaja

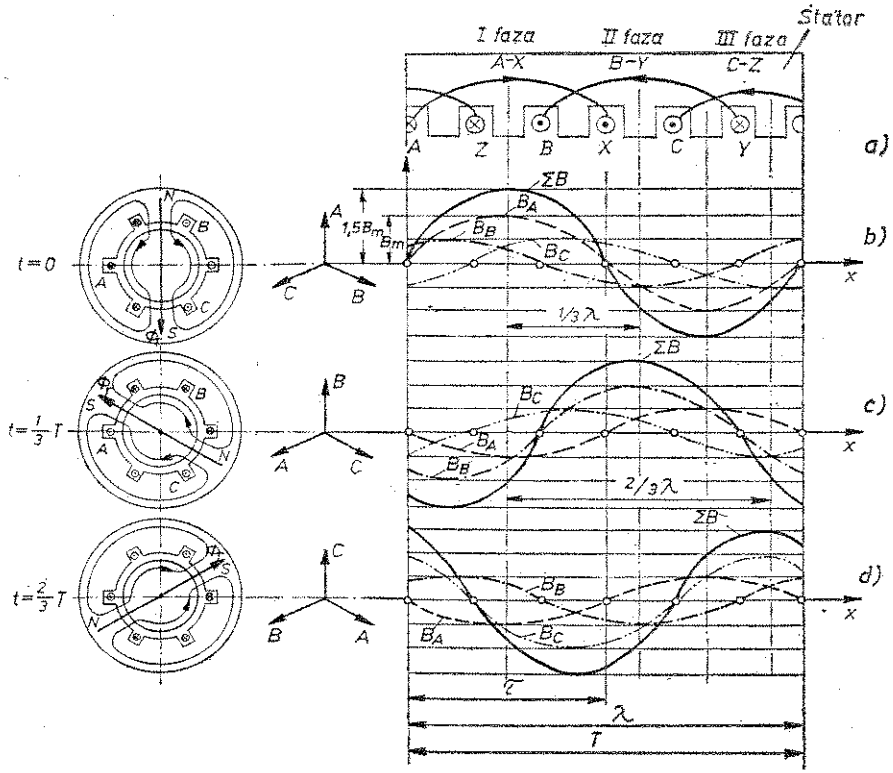
Ako sada na stator umjesto jednog svitka stavimo tri čiji su počeci po obodu statora pomaknuti za 1/3 dužine oboda, dobićemo stator sa tzv. trofaznim namotajem (sl. 2.30). Drugim riječima, trofazna mašina naizmjenične struje na svom statoru ima tri fazna namotaja, međusobno pomaknuta u prostoru za 120°, odnosno 1/3 dvostrukog polnog koraka λ.

Pri simetričnom opterećenju sve tri faze, svaki svitak (fazni namotaj) napajamo strujama jednakim po veličini i međusobno pomaknutim za 120°, odnosno za 1/3 periode T. U svakom svitku pomoću magnetskog napona stvoriće se pulzirajuće magnetsko polje, tako da ćemo u trofaznoj mašini imati tri pulzirajuća magnetska polja međusobno pomaknuta prostorno i vremenski za 120°. Pošto se sva tri polja zatvaraju kroz isto magnetsko kolo, od njih će nastati jedno rezultantno magnetno polje, kako je predstavljeno na dijagramu (sl. 2.31).

Polje stvoreno na ovakav način nazivamo obrtno (okretno) magnetsko polje. Nikola Tesla je 1887. godine prvi došao na ideju i pokusom dokazao da se pomoću višefaznih sistema u namotajima koji miruju može proizvesti obrtno magnetsko polje, što je osnov za rad motora koji je konstruisao iste godine. Teslin motor,

danas poznat pod nazivom indukcioni asinhroni motor, zbog svojih izvanrednih tehničkih karakteristika ima gotovo isključivu primjenu u industrijskim pogonima kao pogonska mašina.

Da je rezultantno magnetsko polje obrtnog karaktera, uvjerićemo se posmatrajući sl. 2.31. Uzimamo najjednostavniji trofazni jednoslojni namotaj statora sa dva pola ($p=1$) kod koga se namotaj jedne faze sastoji od jednog svitka ($m=1$) (sl. 2.31a).



Sl. 2.31. Dijagramski prikaz rezultantnog obrtnog (okretnog) Teslinog magnetskog polja

Vrijeme ćemo računati od trenutka kada je struja prve faze jednaka nuli. Posmatraćemo promjene magnetskog toka dužinom zračnog zazora u nekoliko različitih trenutaka, tj. $t_1=1/4T$; $t_2=1/4T+1/3T$ i $t_3=1/4T+2/3T$.

U svakom od posmatranih trenutaka struja u namotaju jedne faze je pozitivna maksimalna, dok su struje druge dvije faze po vrijednosti upola manje ali negativne.

Pretpostavićemo da je struja koja teče faznim namotajem od njegovog početka do kraja pozitivna, npr. za prvu fazu od A do X, a negativna ako teče obratno, npr. za drugu fazu od Y prema B. Na slikama b, c i d prikazani su vektorski dijagrami struje triju faza kao i od njih stvoreni osnovni valovi magnetskih indukcija (odgovaraju nepokretnim naizmjeničnim magnetskim tokovima).

Sada pristupamo određivanju smjera i pravca vektora rezultantnog magnetskog toka kao i krivulje raspodjele njegove indukcije dužinom zračnog zazora u vremenski odabranim posmatranim trenucima. Sa slika b, c i d vidimo da susjednim svicima, bez obzira kojim fazama pripadaju, teku struje istog smjera i one stvaraju zajednički magnetski tok čiji je smjer isti kao i smjerovi tokova pojedinih svitaka. Smjer zajedničkog magnetskog toka određujemo Amperovim pravilom. Tako smo odredili pravac i smjer rezultantnog magnetskog toka koji se, kako se sa slika vidi, obrće, i to u smjeru kretanja kazalike na satu.

Sa posmatranih slika nije teško uočiti da će osnovni val indukcije koji odgovara rezultantnom magnetskom toku biti u svakom trenutku jednak zbiru osnovnih valova indukcija (B_A, B_B i B_C). To je također sinusoida s amplitudnom vrijednošću $3/2B_m$ i prikazana je debljom linijom. Znači, rezultantno magnetsko polje sa stalnom amplitudnom vrijednošću putuje dužinom oboda statora i to je još jedan dokaz njegovog obrtnog karaktera.

Brzina vrtnje obrtnog magnetskog polja srazmjerna je frekvenciji pulzirajućih polja f (odnosno frekvencije struje), a obrnuto srazmjerna broju pari polova mašine p. Izražavajući brzinu vrtnje sa brojem obrtaja u minuti, dobivamo:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ (}^{o}\text{/min)} \qquad \ldots\ldots (2.21)$$

Ova brzina vrtnje n_1 naziva se sinhrona brzina.

Da zaključimo:

Maksimalna indukcija rezultantnog magnetskog toka putuje dužinom zračnog zazora i nalazi se uvijek u osi onog faznog namotaja u kojem struja u tom trenutku ima svoju najveću vrijednost. Rezultantni magnetski tok obrće se u smjeru kretanja kazaljke na satu i za vrijeme jedne periode T pređe po obodu statora dvostruki polni korak λ. Njegova obodna brzina je:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \qquad \ldots\ldots (2.22)$$

Maksimalna vrijednost osnovnog vala indukcije obrtnog magnetskog toka, proizvedenog pomoću trofaznog statora, veća je za 3/2 puta od maksimalne vrijednosti osnovnog vala indukcije magnetskog toka jednog faznog namotaja.

$$B_{ob} = \frac{3}{2} B_m \qquad \ldots\ldots (2.23)$$

Ukoliko namotaj statora ima q faznih namotaja (faza) prostorno pomaknutih za λ/q i napajanih q-faznim naizmjeničnim strujama, maksimalna indukcija takvog obrtnog magnetskog toka je:

$$B_{ob} = \frac{q}{2} B_m \qquad \ldots\ldots (2.24)$$

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta čini magnetno, a šta električno kolo električne mašine?
2. Koji zadatak ima pobudni namotaj mašine?
3. Kako se naziva dio mašine na kome se nalazi pobudni namotaj?
4. Koji zadatak ima dio mašine koji se naziva induktor, a koji zadatak ima indukt?
5. Koje vrste induktora poznaješ?
6. Šta je navojak, a šta svitak?
7. Kakva je razlika između navojnog i polnog koraka?
8. Kad je navojni korak dijametralan, a kad tetivni?
9. Kakva je razlika između jednoslojnog i dvoslojnog namotaja?
10. Kako nastaje polno-fazna grupa?
11. Kako nastaje fazna grupa?
12. Kako određujemo paralelne grane kod jednoslojnog, a kako kod dvoslojnog namotaja?
13. Kako predstavljamo namotaj električne mašine na crtežu?
14. Kakva je razlika između namotaja s odijeljenim pojasevima i namotaja s mješovitim pojasevima?
15. Kako nastaje obrtno magnetno polje, ko ga je pronašao i kakav značaj ima za asinhrone motore?

2.2. FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD ASINHRONIH MOTORA

2.2.1. Pojam, svrha i primjena asinhronih motora

Asinhroni motor je mašina koja pretvara električnu energiju u mehaničku i može da vrši mehanički rad. Električnu energiju dovodimo na stator, odakle se ona elektromagnetskim putem prenosi na obrtni dio mašine (rotor) i tako se pretvara u mehaničku energiju. Na njegovo vratilo mogu se spojiti raznovrsni radni strojevi koji vrše koristan mehanički rad. To su razni alatni strojevi, poljoprivredni strojevi, strojevi za obradu drveta, pumpe, ventilatori itd. Zbog svoje, kako ćemo kasnije vidjeti, jednostavne konstrukcije, dobrih pogonskih osobina, visokog stepena iskorištenja i velike sigurnosti u radu imaju vrlo široku primjenu u elektromotornim pogonima, industriji, rudarstvu, poljoprivredi i čitavom nizu drugih oblasti.

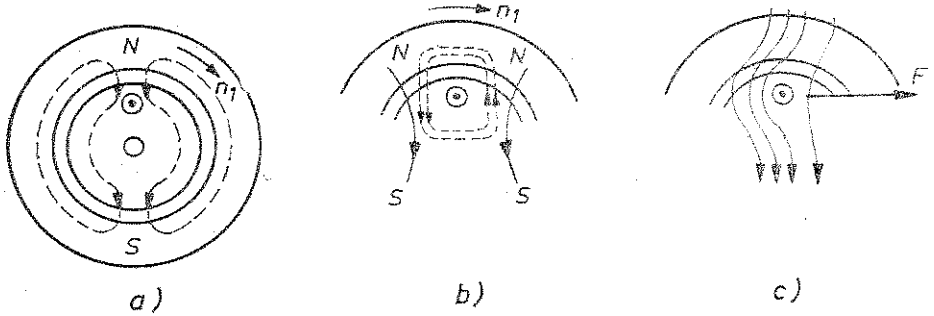
Nedostaci asinhronih motora su u tome što pogoršavaju faktor snage električne mreže na koju su priključeni, što im je ograničena mogućnost regulacije broja okretaja (naročito pri kontinuiranom regulisanju brzine obrtanja) i što su im loše karakteristike pri puštanju u rad. Pokušaji da se ovi nedostaci otklone ostali su bez uspjeha, a u pogledu regulacionih karakteristika još uvijek zaostaju za motorima istosmjerne struje.

U čitavom nizu industrijskih pogona relativno male snage, gdje se ne zahtijeva regulisanje brzine, asinhroni motor je nezamjenjiv. Pri tome sve veći značaj

dobija asinhroni motor s kratkospojenim rotorom, istiskujući iz upotrebe (na mnogim mjestima) asinhroni motor s kliznim prstenovima. Razlozi su u tome što su motori s kratkospojenim rotorom u usporedbi s prstenastim konstruktivno jednostavniji, sigurniji u radu i imaju bolji faktor snage i stepen korisnog djelovanja.

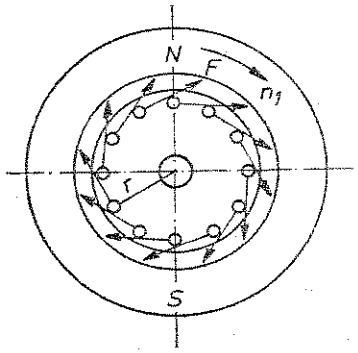
2.2.2. **Princip rada asinhronog motora**

Dovođenjem trofazne naizmjenične struje u namotaje statora trofaznog asinhronog motora stvara se obrtno magnetsko polje koje se vrti sinhronom brzinom n_1. Pretpostavimo da se polje vrti u smjeru kretanja kazaljke na satu i ima polaritet, kako je prikazano na sl. 2.32a. Radi jednostavnosti, posmatramo jedan provod-



Sl. 2.32. Princip rada asinhronog motora a) smjer obrtnog magnetskog polja u jednom momentu, b) djelovanje magnetnog polja na provodnik, c) određivanje smjera elektromagnetne sile F

nik rotora. U momentu priključenja motora na mrežu rotor miruje. Silnice obrtnog magnetskog polja svojom sinhronom brzinom presijecaju provodnike rotora i u njima indukuju napon koji će, ukoliko je rotorski namotaj zatvoren, proizvesti indukovanu struju. Znači, njen uzrok je indukovani napon, pa se ovi motori nazivaju još i indukcioni, tj. njihov rotor je proizvođač električne energije.



Sl. 2.33. Djelovanje elektromagnetnih sila na provodnike rotora i određivanje obrtnog (zakretnog) momenta

Kako dolazi do vrtnje rotora? Posmatramo li provodnik koji se nalazi na rotoru (sl. 2.32b), vidjećemo da imamo situaciju kada provodnikom protiče indukovana struja, a nalazi se pod uticajem obrtnog magnetskog polja. Tako je ostvaren uslov za stvaranje elektromagnetne sile čija je vrijednost

$$F=bil \text{ (N)} \qquad \ldots\ldots (2.25)$$

(upotrijebljena su mala slova zato što su vrijednosti magnetske indukcije i struje promjenljive i trenutne).

Na jednoj strani provodnika koji posmatramo silnice obrtnog magnetskog polja i silnice polja provodnika (stvorila ga indukovana struja što protiče kroz provodnik) imaju isti smjer i sabiraju se, a na drugoj strani smjerovi silnica su suprotni, polje slabi i na toj strani doći će do izbacivanja provodnika (sl. 2.32c). Smjer elektromagnetske sile F određujemo pravilom lijeve ruke, koje glasi: ako silnice obrtnog magnetskog polja ulaze u dlan i ako ispruženi prsti pokazuju smjer struje u provodniku, ispruženi palac će pokazati smjer elektromagnetne sile. Vidimo da ova sila tjera provodnik da se obrće u istom smjeru u kome se vrti i obrtno magnetsko polje. Ovo vrijedi za sve provodnike koji su smješteni po obodu rotora (sl. 2.33). Sve ove elektromagnetske sile koje pojedinačno djeluju na svaki provodnik rotora sa krakom poluprečnika rotora r stvaraju obrtne (zakretne) momente pod čijim se uticajem rotor vrti. Suma svih pojedinih momenata $F \cdot r$ čini rezultantni obrtni (zakretni) momenat motora M. Brzina obrtanja rotora n uvijek je manja od brzine obrtnog magnetnog polja ($n<n_1$), od čega potiče naziv asinhroni. Na ovaj način električna energija koju smo doveli u namotaje statora pomoću trofazne naizmjenične struje pretvara se u mehaničku energiju obrtanja rotora.

2.2.3. **Klizanje asinhronog motora**

Okrećući se, rotor nastoji da stigne brzinu vrtnje obrtnog magnetskog polja, ali u tome ne uspijeva zbog trenja u ležajevima, otpora vazduha i konačno opterećenja. Zato je brzina rotora n uvijek manja od brzine obrtnog magnetskog polja n_1. Znači, ona nije sinhrona već asinhrona i zato se ovi motori nazivaju asinhroni motori.

Razlika između sinhrone brzine n_1 i brzine obrtanja rotora n (asinhrona brzina) naziva se relativna brzina vrtnje obrtnog magnetskog polja i ona iznosi:

$$\Delta s = n_1 - n \qquad \ldots\ldots (2.26)$$

Ukoliko bi (teoretski) rotor svojom brzinom stigao brzinu obrtnog magnetskog polja ($\Delta n=0$), silnice obrtnog magnetskog polja ne bi presijecale provodnike rotora i u njima se ne bi indukovao napon, a rotor bi jednostavno prestao da se vrti.

Odnos između relativne brzine vrtnje obrtnog magnetnog polja (Δs) i sinhrone brzine n_1 naziva se relativno klizanje s:

$$s=\frac{\Delta s}{n_1}=\frac{n_1-n}{n_1}=1-\frac{n}{n_1} \qquad \ldots\ldots (2.27)$$

Ukoliko želimo da relativno klizanje izrazimo u procentima, potrebno je njegovu vrijednost pomnožiti sa 100, tj.:

$$s=\left(1-\frac{n}{n_1}\right) 100\ (\%) \qquad \ldots\ldots (2.28)$$

Kada rotor miruje, tj. kada je $n=0$, relativno klizanje ima svoju najveću vrijednost $s=1$, odnosno 100%. To će nastati onda kada je otporni momenat koji motor mora da savlada veći od obrtnog momenta koji razvija motor (režim kratkog spoja). Pri nominalnom opterećenju motora (rotor se vrti nominalnom brzinom), relativno klizanje je malo i prema snazi motora (od 1 do 1 000 kW)

kreće se oko 1% za motore većih snaga, između 1 i 3% za motore srednjih snaga i za motore veoma malih snaga ide čak i do 8%.

Znajući vrijednost klizanja pri nominalnom opterećenju, pomoću formule za relativno klizanje može se na lak način izračunati asinhrona brzina motora. Npr. za relativno klizanje $s=0{,}05$ (5%) asinhrone brzine bile bi:

— za asinhroni motor s jednim parom polova $p=1$ sinhrona brzina je:

$$n_1=\frac{60f}{p}=\frac{60\cdot 50}{1}=3000\ ^0/\text{min}.$$

Pet posto (5%) od sinhrone brzine je klizanje i za naš primjer iznosi 150 °/min. Ako se od sinhrone brzine oduzme brzina klizanja, dobija se vrijednost asinhrone brzine, tj. 3000−150=2850 °/min;

— ako je asinhroni motor s dva para polova $p=2$, za isto relativno klizanje, asinhrona brzina je 1425 °/min (provjeri!);

— ako je asinhroni motor s tri para polova $p=3$, izračunaj sinhronu i asinhronu brzinu ako je relativno klizanje $s=0{,}04$ (4%)!

Do sada smo govorili o asinhronoj mašini koja radi kao motor sa brojem okretaja rotora u granicama od $n=0$ do $n\approx n_1$, tj. pri klizanju od $s=+1$ do $s\approx 0$.

Idealan prazan hod mašine nastaće pri $n=n_1$, $s=0$, tj. kada brzina rotora dostigne brzinu obrtnog magnetnog polja. U tom momentu silnice obrtnog magnetnog polja imaće isti pravac kao i provodnici rotora, neće biti presijecanja, neće biti indukcije i za trenutak će rotor motora zaostati. Zaostajanje izaziva ponovo indukciju, obrtni momenat i okretanje rotora.

Međutim, ukoliko nekom drugom mašinom povećamo brzinu rotora tako da ona postane veća od sinhrone brzine ($n>n_1$), klizanje postaje negativno, a smjer okretanja polja statora u odnosu na rotor se mijenja na suprotnu stranu u odnosu na onu kada je mašina radila kao motor. Jasno je da će doći do promjene smjera indukovanog napona i struje u provodniku rotora kao i smjera elektromagnetske sile. Momenat što ga razvija asinhroni motor postaje kočeći u odnosu na obrtni momenat pogonske mašine kojom smo izvršili ubrzanje. U ovom slučaju asinhrona mašina nema više ulogu motora već se ponaša kao generator. To je asinhroni generator koji mehaničku energiju dobijenu od pogonske mašine pretvara u električnu i vraća je u mrežu na koju je priključen njegov stator.

Prema tome, kada asinhrona mašina radi kao generator, klizanje se kreće u granicama od $s=0$ do $s=-\infty$.

Za vježbu

Koristeći se objašnjenjem principa rada asinhronog motora i sl. 2.32b. i c, nacrtaj sliku rada asinhrone mašine kao generatora i uvjeri se da ona stvara momenat koji je kočeći u odnosu na pogonsku mašinu!

Asinhroni generator primjenjuje se za proizvodnju električne energije samo u specijalnim postrojenjima, npr. pri spuštanju tramvajskih motornih vozila niz strminu.

Ukoliko pogonskom mašinom okrećemo rotor asinhrone mašine u suprotnom smjeru od vrtnje obrtnog magnetskog polja, onda mašina radi kao elektromagnetna kočnica. Ona dobiva električnu energiju iz mreže, a mehaničku od pogonske mašine. Rotor joj se ponaša kao generator električne energije koja se u njegovim namotajima sva pretvara u toplotu.

Elektromagnetsko kočenje počinje ako je $n=0$ do $n=-\infty$, pri klizanju koje se kreće u granicama od $s=+1$ do $s=+\infty$.

Rad asinhrone mašine kao elektromagnetske kočnice ima široku primjenu na dizalima za smanjenje brzine pri spuštanju tereta.

2.2.4. Približna konstantnost obrtnog magnetskog toka, magnetne indukcije i gubitaka snage u željezu statora

Obrtno magnetsko polje pri svom obrtanju presijeca namotaje statora i rotora i u njima indukuje napone čija vrijednost zavisi od magnetskog toka po polu mašine i od brzine presijecanja provodnika. Kako je brzina presijecanja srazmjerna sa frekvencijom mreže, nije teško zaključiti da će i indukovani napon statora biti srazmjeran sa frekvencijom f.

Indukovani napon statora E_1 prema Lencovom zakonu ima suprotan smjer naponu mreže na koju je stator motora spojen i zove se indukovani protunapon. Razlikuje se od napona mreže za vrijednost aktivnog i induktivnog pada napona u statoru (do 5%). Napon mreže i frekvencija su uvijek stalne vrijednosti, pa proizlazi da će i indukovani protunapon biti približno konstantan, tj.

$$E_1\approx U_1=\text{const.} \qquad \ldots\ldots (2.29)$$

Ne ulazeći u računska razmatranja, vrijednost indukovanog protunapona u provodnicima svake faze statora iznosi:

$$E_1=4{,}44k_{n1}f_1N_1\Phi_{p0}\ \text{(V)} \qquad \ldots\ldots (2.30)$$

gdje Φ_{p0} označava magnetski tok po magnetskom polu, N_1 broj navojaka po faznom namotaju statora, f_1 frekvenciju struje statora, a k_{n1} faktor namotaja statora.

Iz formule vidimo da će pri stalnoj vrijednosti napona mreže i frekvencije, vrijednost obrtnog magnetskog toka po magnetskom polu Φ_{p0} biti približno konstantna, tj.

$$\Phi_{p0}\approx\text{const.} \qquad \ldots\ldots (2.31)$$

Koristeći se već poznatom formulom (2.8) $\Phi_{p0}=2/\pi\ B_m\tau_c l$, iz koje se vidi odnos magnetskog toka po polu i njegove maksimalne indukcije, zaključujemo: maksimalna indukcija obrtnog magnetskog toka biće približno konstantna kada je stator asinhronog motora spojen na mrežu napona i frekvencije stalne vrijednosti.

Pri radu asinhronog motora od praznog hoda do nominalnog opterećenja, maksimalna indukcija obrtnog magnetskog toka ostaje nepromijenjena, pa pišemo da je:

$$B_m=\text{const.} \qquad \ldots\ldots (2.32)$$

Približna stalna vrijednost magnetskog toka i magnetske indukcije u limovima statora asinhronog motora priključenog na mrežu stalnog napona i stalne frekvencije potvrđuje činjenicu da su i gubici snage u željezu P_{Fe} približno stalni za vrijeme rada asinhronog motora od praznog hoda do nominalnog opterećenja:

$$P_{Fe}\approx\text{const.} \qquad \ldots\ldots (2.33)$$

Zaista, gubici snage u željezu pri određenoj vrsti statorskih limova zavise od kvadrata maksimalne magnetske indukcije B_m^2 i od fredvencije f.

2.2.5. **Indukovani napon, frekvencija i gubici snage u željezu rotora**

Pošto obrtno magnetsko polje, kako smo već kazali, zahvata i namotaje rotora, u njima će se indukovati napon čija vrijednost po svakom faznom namotaju iznosi:

$$E_2=4{,}44k_{n2}f_2N_2\Phi_{po}\ (\mathrm{V}) \qquad \ldots\ldots\ (2.34)$$

gdje je f_2 frekvencija indukovanog napona rotora, a N_2 broj navojaka po fazi rotora. Ona zavisi ne samo od brzine kojom obrtni magnetni tok presijeca provodnike rotora nego i od brzine kojom se vrti rotor. Naime, kada rotor miruje, presijecanje je isto i za provodnike statora i za provodnike rotora, pa je $f_1=f_2$. Međutim, kada se rotor počne vrtjeti i kada dostigne brzinu n, onda će brzina presijecanja rotorskih provodnika biti $\Delta s=n_1-n$. Znači, frekvencija napona u namotaju rotora biće:

$$f_2=\frac{p\Delta s}{60} \qquad \ldots\ldots\ (2.35)$$

Da bismo došli do jednostavnijeg izraza za frekvenciju rotora f_2, koristimo se činjenicom da frekvencija statora ovisi o sinhronoj brzini, a frekvencija rotora o njenoj relativnoj brzini. Iz ovoga nije teško zaključiti da će se frekvencija u rotoru f_2 odnositi prema frekvenciji u statoru f_1 onako kako se relativna brzina Δs odnosi prema sinhronoj brzini n_1. Dakle:

$$\frac{f_2}{f_1}=\frac{\Delta s}{n_1}=s$$

odakle je

$$f_2=s\,f_1 \qquad \ldots\ldots\ (2.36)$$

Iz dobivenog izraza vidimo da frekvencija rotorskih veličina u asinhronom motoru zavisi od frekvencije statorskih veličina f_1 i relativnog klizanja motora s. Pošto je frekvencija statora f_1 uvijek poznata i stalna veličina, za izračunavanje frekvencija rotorskih veličina dovoljno je poznavati vrijednost relativnog klizanja motora s. Budući da je klizanje asinhronog motora promjenljiva veličina, i to upravo srazmjerna sa opterećenjem, zaključujemo da je frekvencija f_2 kao funkcija klizanja također promjenljiva veličina.

Primjer

Neka asinhroni motor pri nominalnom opterećenju i pri standardnoj industrijskoj frekvenciji $f_1=50$ Hz ima klizanje $s=0{,}04$ (4%). Kolika mu je frekvencija rotora f_2?

Rješenje

$$f_2=s\ f_1=0{,}04\cdot 50=2\ \mathrm{Hz}$$

Vidimo da je frekvencija rotorskih veličina vrlo mala (u našem primjeru 25 puta manja od frekvencije statorskih veličina).

Za vrijednosti klizanja $s=0{,}08$ i $s=0{,}01$ izračunaj frekvenciju rotora f_2!

Pošto gubici uslijed histereze zavise od frekvencije, jasno je da će oni u rotoru biti i do sto puta manji nego u istoj masi željeza u statoru. Gubici nastali u željezu rotora uslijed vrtložnih struja zavise od kvadrata frekvencije, pa su oni i do 10 000 puta manji nego u istoj masi željeza u statoru.

Da zaključimo:

Gubici snage u željezu rotora nastali uslijed histereze i vrtložnih struja su vrlo mali (magnetišu se mali broj puta u sekundi), pa ih pri normalnom radu asinhronog motora možemo zanemariti.

2.2.6. **Gubici snage u bakru rotora**

Suma svih pojedinačnih momenata elektromagnetnih sila ($M=F\cdot r$) što djeluju na provodnike smještene u utore po obodu rotora, nastale pod uticajem obrtnog magnetskog toka i indukovane struje u rotoru, čine rezultantni obrtni momenat asinhronog motora M. Ako umjesto brzine obrtnog magnetskog toka koju smo izražavali u ^{0}/min posmatramo kao ugaonu brzinu $\omega=2\pi n$, analogno formulama za klizanje (2.26. i 2.27) dobivamo:

$$\Delta\omega=\omega_1-\omega,\ \text{odnosno}$$

$$s=\frac{\Delta\omega}{\omega_1}=\frac{\omega_1-\omega}{\omega_1}=1-\frac{\omega}{\omega_1} \qquad \ldots\ldots\ (2.37)$$

Tako će snaga obrtnog magnetskog toka biti:

$$P_{em}=M\omega_1 \qquad \ldots\ldots\ (2.38)$$

Ova snaga statora se pomoću obrtnog magnetskog toka prenosi na rotor elektromagnetskim putem, pa za istu postoji i naziv elektromagnetna snaga. Tako dobivamo mehaničku snagu rotora:

$$P_r=M\omega \qquad \ldots\ldots\ (2.39)$$

gdje je ω ugaona brzina rotora.

Razlika između snage obrtnog magnetskog toka koju rotor prima sa statora P_{em} i mehaničke snage koju razvija rotor motora na svojoj osovini P_r biće:

$$P_{em}-P_r=M\omega_1-M\omega=M(\omega_1-\omega).$$

Kako je $\omega_1-\omega=s\omega_1$ formula (2.37), imamo:

$$P_{em}-P_r=s\,M\omega_1,$$

a pošto je $P_{em}=M\omega_1$ formula (2.38), konačno dobivamo:

$$P_{em}-P_r=s\,P_{em} \qquad \ldots\ldots\ (2.40)$$

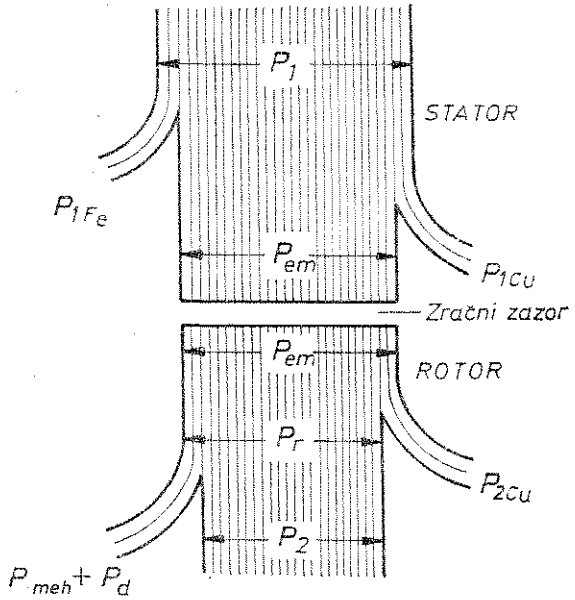
Mehanička snaga rotora manja je od snage statora za onoliko koliko iznose gubici snage nastali u rotoru. Prema tome, razlika snaga $P_{em}-P_r$ predstavlja zbir gubitaka snage u rotoru. To su: džulovi gubici snage u namotajima rotora P_{2Cu} i gubici snage u željezu nastali uslijed histereze i vrtložnih struja P_{2Fe}. Kako smo već utvrdili, gubici snage u željezu pri normalnom radu motora su neznatni, tako da ih možemo zanemariti, pa nam razlika $P_{em}-P_r$ pokazuje gubitak snage u bakru rotora. Dakle:

$$P_{2Cu}=q_2R_2I_2^2=s\,P_{em} \qquad \ldots\ldots\ (2.41)$$

Iz formule zaključujemo da je gubitak snage u bakru rotora direktno proporcionalan s klizanjem motora. To znači, koliko procenata iznosi klizanje, toliko procenata iznose i gubici snage u rotoru od snage dovedene iz statora u rotor.

2.2.7. Stepen korisnog djelovanja asinhronog motora

Prilikom rada asinhronog motora dovedena električna snaga iz mreže na koju je priključen mora biti veća od mehaničke snage na osovini rotora za vrijednost nastalih gubitaka u mašini. Proces pretvaranja snage, počevši od dovedene pa sve do predate snage mašine, najjednostavnije ćemo predstaviti pomoću energetskog dijagrama (sl. 2.34).



Sl. 2.34. Energetski dijagram pretvaranja snage u asinhronom motoru

Stator asinhronog motora uzima iz mreže električnu snagu

$$P_1 = qU_1 I_1 \cos\varphi \qquad \ldots\ldots (2.42)$$

gdje je q broj faza mašine, U_1 fazni napon statora, I_1 fazna struja statora, a $\cos\varphi$ faktor snage motora.

Ona se djelimično troši u statoru na gubitke snage u bakru $P_{1Cu}=qI_1^2R_1$ i na gubitke snage u željezu P_{1Fe}. Preostala snaga statora P_{em} pomoću obrtnog magnetskog toka prelazi na rotor elektromagnetskim putem. Iz navedenog slijedi:

$$P_{em} = P_1 - (P_{1Cu} + P_{1Fe}) \qquad \ldots\ldots (2.43)$$

Kada od elektromagnetske snage P_{em} predate rotoru oduzmemo gubitke snage u bakru rotora P_{2Cu}, dobijemo punu mehaničku snagu koju rotor razvija P_r. Tako je:

$$P_r = P_{em} - P_{2Cu} \qquad \ldots\ldots (2.44)$$

Konačno, da bismo došli do korisne mehaničke snage na osovini rotora P_2, moramo od pune mehaničke snage oduzeti mehaničke gubitke P_{meh} (nastaju uslijed trenja u ležajevima i otpora vazduha) i dodatne gubitke P_d (koji se pojavljuju u zupcima rotora i statora kao posljedica pulzacije magnetskog toka te gubitaka uzrokovanih višim harmonicima magnetskog napona pri opterećenju). Dakle:

$$P_2 = P_r - (P_{meh} + P_d) \qquad \ldots\ldots (2.45)$$

Stepen korisnog djelovanja asinhronog motora je odnos korisne mehaničke snage i dovedene (utrošene) električne snage

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \qquad \ldots\ldots (2.46)$$

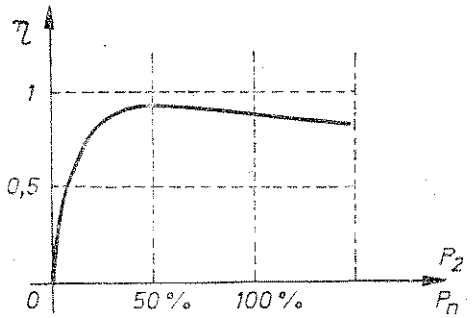
Pošto je korisna mehanička snaga manja od utrošene električne za onoliko koliko iznosi suma gubitaka u motoru $\Sigma(Pg)$, stepen korisnog djelovanja možemo i ovako izraziti:

$$\eta = \frac{P_1 - \sum(Pg)}{P_1} = 1 - \frac{\sum(Pg)}{P_1} \qquad \ldots\ldots (2.47)$$

ili

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum(Pg)} \qquad \ldots\ldots (2.48)$$

Kako se dio gubitaka snage u asinhronom motoru mijenja s opterećenjem, jasno je da će se i stepen korisnog djelovanja također mijenjati s promjenom opterećenja. Sa sl. 2.35. vidi se da s porastom opterećenja stepen korisnog djelovanja motora naglo raste da bi već kod 50% nominalnog opterećenja bilo blizu svoje najveće vrijednosti koja se redovno javlja kod 70÷75% nominalnog tereta. Poslije toga krivulja iskorištenja polagano pada s porastom opterećenja sve do nominalnog tereta.



Sl. 2.35. Stepen korisnog djelovanja asinhronog motora u zavisnosti od promjene opterećenja

Stepen korisnog djelovanja kod vrlo malih motora iznosi 0,7÷0,8. Kod motora male nominalne snage kreće se od 0,8÷0,85, kod srednje 0,8÷0,9, a kod vrlo velikih i do 0,95.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Objasni kako radi asinhroni motor!
2. Šta nazivamo sinhronom, a šta asinhronom brzinom?
3. Objasni pojam klizanja!
4. U kom slučaju se asinhrona mašina ponaša kao generator, a u kom slučaju kao kočnica?
5. Objasni približnu stalnost obrtnog magnetskog toka, magnetske indukcije i gubitaka snage u željezu statora!
6. Od čega zavisi frekvencija rotora?
7. Kako izračunavamo gubitke snage u željezu i bakru rotora?
8. Kako dolazimo do stepena korisnog djelovanja asinhronog motora i šta nam on pokazuje?

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

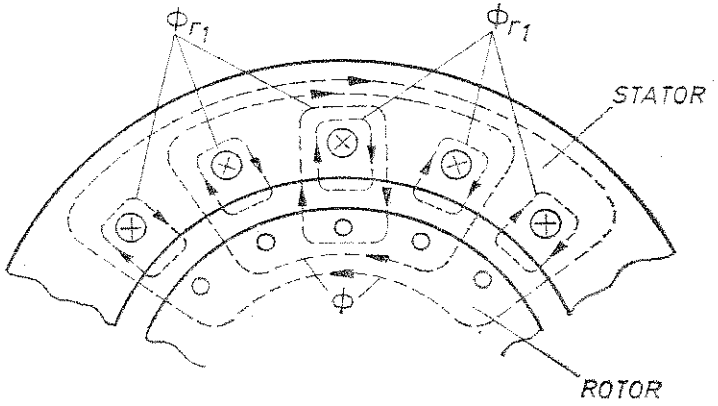
2.3. ASINHRONA MAŠINA SA ZAKOČENIM (MIRUJUĆIM) ROTOROM

Asinhrona mašina čiji rotor miruje (zakočen je) ponaša se kao transformator. Razlikuje se od transformatora normalne izvedbe u konstruktivnom pogledu (raspored namotaja na statoru i rotoru, postojanje zračnog zazora itd.). U pogledu načina rada, razlika između asinhronog motora sa zakočenim rotorom i transformatora je u tome što kod transformatora magnetski tok ima stalno isti pravac prostiranja, a mijenjaju mu se intenzitet i smjer, dok kod asinhronog motora imamo isti intenzitet magnetnog toka, a stalno mu se mijenjaju pravac i smjer djelovanja. U prvom se, dakle, slučaju radi o vremenskim, a u drugom o prostornim promjenama. Iako je praktična primjena asinhronih mašina sa zakočenim rotorom veoma rijetka, njihovo proučavanje, isto kao i transformatora, započećemo graničnim režimima rada, tj. praznim hodom i kratkim spojem sa proširenjem na mašinu sa rotorom koji se vrti.

2.3.1. Prazan hod asinhrone mašine sa zakočenim rotorom

Kada je namotaj statora asinhrone mašine spojen sa mrežom, a namotaj zakočenog rotora otvoren, kažemo da je asinhrona mašina, u stvari, transformator u praznom hodu. Primarna strana je stator motora, a mirujući rotor je sekundar. Dovedeni napon na stator U_1 njegovim namotajima tjera struju praznog hoda I_0 koja stvara obrtni magnetski tok. Veći dio magnetskog toka Φ zahvata namotaje i statora i rotora, pa ga nazivamo kao i kod transformatora glavnim tokom, dok drugi

manji dio Φ_{r1} zahvata samo namotaje statora i zovemo ga rasipnim tokom (sl. 2.36). Glavni magnetski tok Φ indukuje u namotajima statora i rotora napone E_1 i E_2, a rasipni tok Φ_{r1} indukuje napon rasipanja $\bar{E}_{r1} = -j\bar{I}_0 X_1$ samo u namotaju statora. Struja I_0 prolazeći kroz namotaj s aktivnim otporom R_1 izaziva elektrootpornu silu $\bar{E}_{R1} = -\bar{I}_0 R_1$.



Sl. 2.36. Magnetna polja statora pri praznom hodu asinhrone mašine (rotor otvoren)

Međusobna zavisnost između dovedenog napona U_1 i indukovanih napona E_1, E_{R1} i E_{r1} određena je, kao kod transformatora (vidi formule 1.24. do 1.28), zakonom ravnoteže napona:

$$\bar{U}_1 = -(\bar{E}_1 + \bar{E}_{R1} + \bar{E}_{r1}) \qquad \ldots\ldots (2.49)$$

ili

$$\bar{U}_1 = -(\bar{E}_1 - \bar{I}_0 R_1 - j\bar{I}_0 X_1) = -\bar{E}_1 + \bar{I}_0 \bar{Z}_1 \qquad \ldots\ldots (2.50)$$

gdje je $\bar{Z}_1 = R_1 - jX_1$ impedanca motora statora.

Na osnovu ovih izraza konstruišemo vektorski dijagram praznog hoda asinhronog motora. On se konstruiše isto kao odgovarajući dijagram transformatora. Za vježbu (koristeći sl. 1.5) nacrtaj vektorski dijagram praznog hoda asinhronog motora!

Pri konstruisanju dijagrama moramo uzeti u obzir da je struja praznog hoda I_0 zbog postojanja zračnog zazora mnogo veća nego kod transformatora. Kod motora veće i srednje snage iznosi $20 \div 35\%$ nominalne struje, dok kod motora male snage ide čak i do 50% nominalne struje. Otpori R_1 i X_1 su također veći. Indukovani naponi E_{R1} i E_{r1} iznose 2 do 8% napona U_1, u zavisnosti od snage mašine.

Ipak, ovdje su najznačajnije veličine, glavni magnetski tok Φ i odgovarajući indukovani napon E_1, pa u približnim razmatranjima možemo kazati da je:

$$\bar{U}_1 \approx -\bar{E}_1 \qquad \ldots\ldots (2.51)$$

Vrijednost indukovanog napona u faznom namotaju statora je:

$$E_1 = 4{,}44\, f N_1 k_{n1}\, \Phi_m, \qquad \ldots\ldots (2.52)$$

a u faznom namotaju rotora:

$$E_2 = 4{,}44\, f N_2 k_{n2}\, \Phi_m \qquad \ldots\ldots (2.53)$$

gdje su:

N_1 i N_2 — broj serijski spojenih navoja jednog faznog namotaja statora, odnosno rotora;

k_{n1} i k_{n2} — faktor namotaja statora, odnosno rotora;

Φ_m — maksimalna vrijednost glavnog magnetskog toka.

Dijeljenjem jednačina 2.52. i 2.53. dobivamo već poznati odnos transformacije

$$k_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_{n1}}{N_2 k_{n2}} \qquad \ldots\ldots (2.54)$$

Kako se vidi, ovaj odnos transformacije razlikuje se od odnosa transformacije transformatora za odnos faktora namotaja k_{n1} i k_{n2}.

2.3.2. **Kratak spoj asinhrone mašine sa zakočenim rotorom**

Kada je stator asinhrone mašine priključen na mrežu, a namotaj zakočenog rotora električki zatvoren, kažemo da je asinhrona mašina kratko spojena. Ovakav režim rada vrlo je sličan režimu rada kratko spojenog transformatora. Razlikuje se u tome što je kod asinhronog motora trajna struja kratkog spoja I_k za $4 \div 7$ puta veća od njegove nominalne struje I_n, dok kod transformatora iznosi $(10 \div 18)$ I_n.

I pored toga, motor ne smije ostati dugo vremena u ovom stanju pod punim naponom da bi se izbjeglo preveliko zagrijavanje. Zato se pri pokusu kratkog spoja motoru dovodi sniženi napon tako da struja kratkog spoja I_k bude približno jednaka nominalnoj struji I_n.

Pojave pri kratkom spoju asinhronog motora su iste kao kod transformatora. Zato je vektorski dijagram kratkog spoja asinhronog motora isti kao kod transformatora (vidi sl. 1.10).

Međutim, uslovi svođenja (reduciranja) rotora asinhronog motora na njegov stator složeniji su nego u transformatora, jer se rotor po konstrukciji razlikuje od statora. Zato namotaj rotora pri reduciranju mora imati isti broj faznih namotaja, isti broj navoja u fazi i istu raspodjelu namotaja kao i namotaj statora.

Pošto je pri kratkom spoju asinhronog motora glavni magnetski tok Φ_k malen, možemo kao i kod transformatora magnetni napon M_0 i struju I_0 zanemariti. Prema tome, koristeći se formulom (1.45), iz uslova ravnoteže magnetskih napona statora i rotora dobivamo:

$$q_1 N_1 k_{n1} I_1 = q_2 N_2 k_{n2} I_2,$$

odakle je:

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{q_1 N_1 k_{n1}}{q_2 N_2 k_{n2}} \qquad \ldots\ldots (2.55)$$

gdje je:

k_i — odnos transformacije struja, a q_1 i q_2 broj faznih namotaja statora i rotora.

Iz jednačine 2.55. dobivamo:

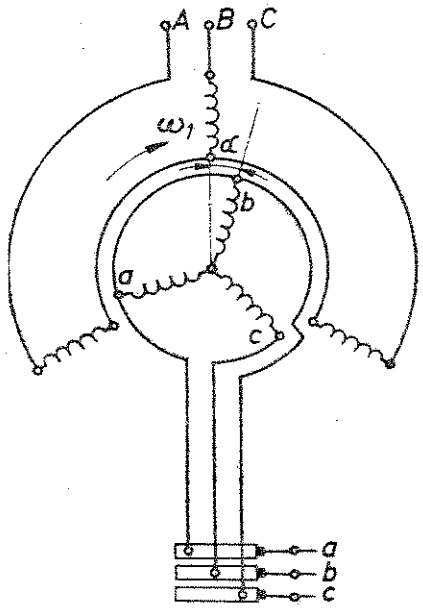
$$I_1 = \frac{I_2}{k_i} = I_2' \qquad \ldots\ldots (2.56)$$

gdje je I_2' reducirana struja rotora.

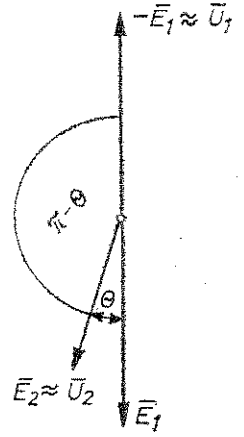
* * * * * * * * *

2.3.3. **Primjena asinhrone mašine sa zakočenim rotorom**

Asinhrona mašina sa zakočenim rotorom je, kako smo već vidjeli, poseban oblik transformatora. Mada nema širu primjenu, ipak se ponekad upotrebljava kao *regulator faze* i kao *indukcioni regulator*. U ovu svrhu mogu se upotrebljavati samo asinhroni motori sa kliznim prstenovima.



Sl. 2.37. Shema transformatora (regulatora) faze



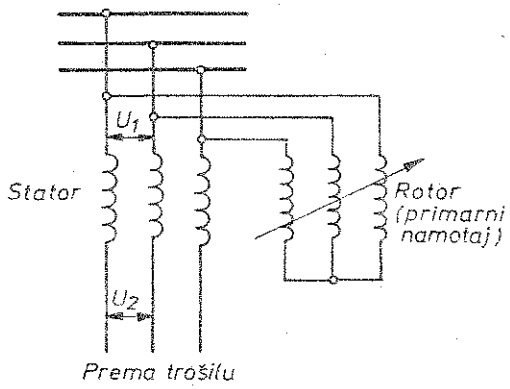
Sl. 2.38. Pomak sekundarnog napona prema primarnom kada se rotor zakreće u smjeru obrtnog magnetnog toka

Trofazni asinhroni motor čiji je rotor zakočen i pomoću naročitog uređaja zakretanjem može se mijenjati položaj njegova namotaja u odnosu na namotaj statora, predstavlja transformator sa obrtnim magnetskim poljem. Zakretanjem rotora za neki ugao α uvijek je manji od onog koji odgovara punom koraku. Vrši se ručno (pomoću zamajca) ili pomoću elektromotora.

Na sl. 2.37. predstavljen je namotaj statora asinhronog motora koji je priključen na mrežu, a rotor zakrenut za ugao α npr. u smjeru obrtanja magnetskog polja. Obrtni magnetski tok najprije će presijecati provodnike prve faze statora, a zatim provodnike iste faze rotora. Indukovani napon prve faze rotora vremenski će zaostajati iza indukovanog napona odgovarajuće faze statora za ugao θ izraženim u električnim stepenima (sl. 2.38). Ovo isto važi i za ostale faze.

Pošto indukovani napon statora E_1 ima suprotan smjer u odnosu na napon U_1, izlazi da u slučaju zakretanja rotora u smjeru obrtnog magnetskog toka indukovani napon E_2, a time i napon U_2 prednjači naponu U_1. Obratno, kada se rotor zakreće u suprotnom smjeru od onoga u kome se magnetski tok obrće, U_2 zaostaje iza napon U_1.

Da zaključimo: zakrećući rotor u odnosu na stator, lagano se mijenja faza indukovanog napona rotora, pa se često *ovakav režim rada asinhronog motora* naziva *transformator faze* ili *regulator faze*. Primjenjuje se u laboratorijske svrhe, posebno pri ispitivanju električnih brojila i drugih instrumenata.



Sl. 2.39. Shema trofaznog indukcionog regulatora

Spojimo li namotaje statora i zakočenog rotora trofaznog asinhronog motora prema sl. 2.39. dobićemo *transformator sa obrtnim poljem*, odnosno *indukcioni regulator* pomoću koga možemo kontinuirano regulisati (podešavati) napon. Iz praktičnih razloga rotor u ovom slučaju ima ulogu primarnog namotaja koji se može zakretati, a stator služi kao sekundarni namotaj. Počeci i jednog i drugog namotaja spojeni su na primarnu mrežu čiji je fazni napon U_1, dok su završeci namotaja statora priključeni na sekundarnu mrežu faznog napona U_2. Završetke namotaja rotora spajamo u trougao ili u zvijezdu (u našem primjeru u zvijezdu).

Kako radi trofazni indukcioni regulator?

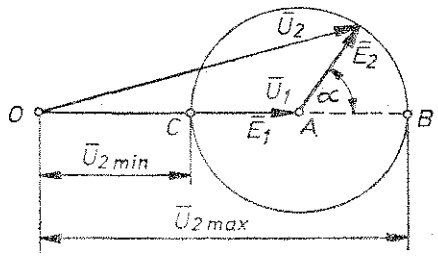
Trofazna struja dovedena u rotor stvara obrtno magnetno polje koje se vrti sinhronom brzinom u smjeru kretanja kazaljke na satu i u faznim namotajima rotora i statora indukuje napone E_1 i E_2. Indukovani napon E_1 drži ravnotežu primarnom naponu U_1. Zanemarujući male padove napona na primaru, napon na izlazu regulatora U_2 približno je jednak geometrijskom zbiru indukovanih napona E_1 i E_2, kako je predstavljeno vektorskim dijagramom (sl. 2.40). Dakle:

$$\bar{U}_2 \approx \bar{E}_1 + \bar{E}_2 \qquad \ldots\ldots (2.57)$$

Pretpostavimo da se osi faznih namotaja rotora i statora prostorno podudaraju. U tom slučaju magnetski tok istovremeno nailazi na oba namotaja mašine i u njima indukuje napone E_1 i E_2 koji se također podudaraju u fazi, i na krajevima regulatora imaćemo maksimalan napon $\bar{U}_{2max} = \overline{OB} = \bar{E}_1 + \bar{E}_2$.

Zakretanjem rotora za bilo koji fazni ugao $\alpha = \pm 180°$ indukovani napon E_2 ne mijenja se po veličini, ali se mijenja po fazi za isti takav ugao u odnosu na fazu indukovanog napona E_1. Kako se sa dijagrama vidi, vrh vektora E_2 opisuje krug iz tačke A radijusa $\bar{E}_2 = \overline{AB}$. Ako rotor zakrenemo za 180° na krajevima regulatora, dobićemo najmanji napon $\bar{U}_{2min} = \overline{OC} = \bar{E}_1 - \bar{E}_2$.

Da zaključimo: pomoću indukcionog regulatora kontinuirano mijenjajući fazu napona E_2, na lak način regulišemo napon U_2 u granicama od U_{2min} do U_{2max}.



Sl. 2.40. Vektorski dijagram napona indukcionog regulatora

Ovakvu finu kontinuiranu regulaciju napona u vrlo širokim granicama nismo mogli postići pomoću običnog transformatora. Zato su indukcioni regulatori našli primjenu u distributivnim mrežama (elektrane, transformatorske stanice) za održavanje napona na nominalnoj vrijednosti, za široku regulaciju napona pojedinih trošila kao što su elektropeći, pretvarači itd. Također se upotrebljavaju u laboratorijima, automatici i tehnici električnih mjerenja (baždarenje brojila, vatmetara itd.).

PITANJA ZA PROVJERU

1. Kako se ponaša asinhrona mašina kada joj je rotor zakočen?
2. Šta se dešava u asinhronoj mašini kada je namotaj zakočenog rotora otvoren?
3. Šta će se desiti u asinhronoj mašini kada namotaj zakočenog rotora zatvorimo?
4. Gdje se primjenjuje asinhrona mašina sa zakočenim rotorom?
5. Kako radi trofazni indukcioni regulator, zašto nam služi i gdje se primjenjuje?

2.4. POJAVE, SVOJSTVA I KARAKTERISTIKE ASINHRONOG MOTORA U POGONU

2.4.1. Prazan hod asinhronog motora

Priključimo li stator asinhronog motora na mrežu struja koja teče namotajima statora, stvoriće obrtno magnetsko polje koje će u svakom faznom namotaju rotora indukovati napon E_2. Ako je električno kolo rotora zatvoreno kroz njegove namotaje

će poteći struja I_2 koja će zavisiti od indukovanog napona E_2 i prividnog otpora rotorskog namotaja (impedance) Z. Dakle:

$$I_2=\frac{E_2}{Z_2}=\frac{E_2}{\sqrt{R_2^2+X_2^2}} \qquad \ldots\ldots (2.58)$$

Kako smo već ranije ustanovili, stvoriće se obrtni momenat u pravcu obrtnog magnetskog polja, koji je proporcionalan struji I_2, magnetskom toku Φ i kosinusu ugla između njih, tj.

$$M=kI_2\,\Phi\cos\varphi_2 \qquad \ldots\ldots (2.59)$$

Ukoliko rotor nije čvrsto zakočen, počeće se okretati. Brzina vrtnje raste i približava se sinhronoj brzini, odnosno brzini obrtnog magnetskog polja $n_1=60f_1/p$. Rotor će se ubrzavati tako dugo dok se momenat motora M ne izjednači s momentom tereta M_t i time uspostavi stanje ravnoteže

$$M=M_t \qquad \ldots\ldots (2.60)$$

Kada na osovini rotora nema tereta, onda kažemo da se motor vrti u praznom hodu. On tada nema korisnog momenta, ali još uvijek mora savladati protumomenat nastao uslijed trenja u vlastitim ležajevima, otpora vazduha i otpora ventilacije. Za savladavanje tog protumomenta potrebna je vrlo mala struja I_2, a time i vrlo mali napon E_2. Klizanje motora s_0 biće vrlo malo (iznosi 0,01 ÷ 0,03).

2.4.2. Asinhroni motor pod opterećenjem

Opteretimo li osovinu asinhronog motora nekim teretom, rotor će se početi sporije okretati. Smanjenjem broja okretaja rotora povećava se klizanje. Porastom klizanja motora povećaće se i brzina obrtnog magnetskog polja prema rotoru, pa time nastaje i povećanje struje u rotoru. Veća struja u rotoru uzrokuje veću struju u statoru, tj. motor vuče iz mreže veću struju (uporedi sa sekundarnom stranom transformatora). Drugim riječima kazano, što je motor više mehanički opterećen biće utoliko više i električki opterećen.

Porastom struje u statoru u njegovim namotajima povećaće se i padovi napona. Pošto je napon U_1 na koji je priključen motor stalan, za održavanje ravnoteže mora indukovani napon E_1 opasti za odgovarajuću vrijednost. Naravno, za istu tu vrijednost biće manji i magnetski tok Φ i struja I_0.

Kako od praznog hoda do opterećenja nominalnom snagom promjena magnetskog toka Φ iznosi nekoliko postotaka, opisane pojave u vezi s tim možemo zanemariti, i za praksu je dovoljno tačno da ukoliko je napon U_1 stalan, biće i magnetski tok stalan.

2.4.3. Obrtni (zakretni) momenat asinhronog motora

Kod elektromotornih pogona karakteristika opterećenja (tereta) gotovo uvijek je određena krivuljom momenta tereta u zavisnosti od brzine vrtnje

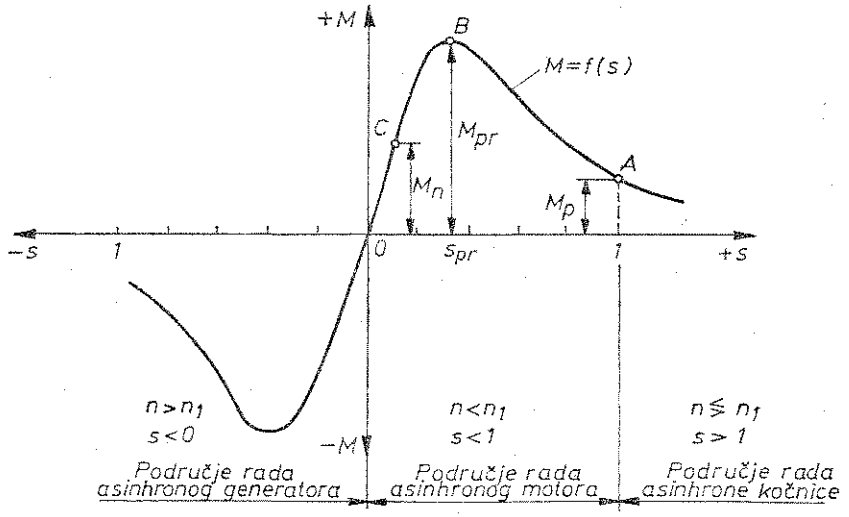
$$M_t=f(n) \qquad \ldots\ldots (2.61)$$

Iz istih razloga i obrtni momenat M iskazaćemo u zavisnosti od brzine vrtnje, odnosno od klizanja, što je isto. Dakle:

$$M=f(n)=f(s) \qquad \ldots\ldots (2.62)$$

Svaki asinhroni motor građen je za određenu snagu, napon i frekvenciju. Da bi mogao da savlada na osovinu priključen vanjski teret, tj. otporni momenat tereta M_t, motor mora, kako smo već ranije kazali, da stvori odgovarajući *obrtni momenat* M. To je, u stvari, momenat elektromagnetnih sila što djeluju na provodnike rotora, pa ga još nazivamo i *elektromagnetski momenat*.

Na sl. 2.41. prikazano je kako se mijenja obrtni momenat asinhronog motora pri stalnom naponu. Kako on zavisi od broja okretaja motora n, odnosno klizanja



Sl. 2.41. Krivulja (karakteristika) obrtnog momenta asinhrone mašine

s, krivulja koju smo dobili naziva se *krivulja (karakteristika) obrtnog momenta asinhronog motora*. Krivulja izražena u funkciji klizanja prikazana je za sva tri radna područja asinhrone mašine — *motorski*, *generatorski* i *kao kočnice*. Za praktične potrebe najznačajnije je područje motorskog rada, tj. dio krivulje koji karakteriše svojstva asinhronog motora ($s=1$ do $s=0$).

Sa slike vidimo da u momentu pokretanja ($n=0$, $s=1$) asinhroni motor može da razvije obrtni momenat određen tačkom A. Taj momenat nazivamo *pokretni* ili *potezni momenat* asinhronog motora M_{po}. On predstavlja važnu karakterističnu veličinu asinhronog motora koja pokazuje ispod koje vrijednosti mora biti momenat tereta da bi ga asinhroni motor mogao savladati, odnosno da bi se motor mogao pokrenuti.

Nakon pokretanja broj okretaja asinhronog motora počinje se povećavati (klizanje se smanjuje!), tako da obrtni momenat raste do nekog određenog klizanja pri kojem se postiže najveći obrtni momenat motora. Tu maksimalnu vrijednost

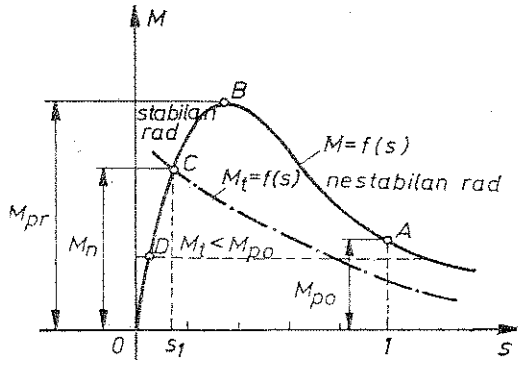
obrtnog momenta (na krivulji u tački B) nazivamo *prekretni* ili *kritični momenat* asinhronog motora M_{pr}. Daljnjim povećanjem brzine vrtnje (klizanje i dalje opada) obrtni momenat naglo opada sve do nule. To je tačka u kojoj asinhroni motor teoretski postiže sinhronu brzinu ($n_1=n$, $s=0$, $M=0$).

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI – NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

2.4.4. Stabilnost rada asinhronog motora u pogonu

Stabilnost rada asinhronog motora ne zavisi samo od njegovog obrtnog momenta nego i od karakteristike tereta, odnosno radne mašine koju motor pokreće. Znači, pod stabilnošću rada motora podrazumijevamo sposobnost motora da uspostavi ustaljenu brzinu obrtanja poslije kratkotrajnih poremećaja nastalih promjenom opterećenja, napona mreže na koju je motor priključen itd.

Svaki teret (mehanizam, radna mašina itd.) koji se pokreće asinhronim motorom ima svoju karakteristiku tereta M_t, ovisnu o brzini vrtnje. Tako npr. postoje radne mašine kod kojih je momenat tereta stalan, tj. ne ovisi o brzini vrtnje, a ima i takvih tereta čiji momenat ovisi o brzini, npr. ventilator, centrifugalna pumpa i druge.



Sl. 2.42. Karakteristika obrtnog momenta asinhronog motora i otpornog momenta tereta (npr. radne mašine)

Pretpostavimo da asinhroni motor sa potpuno određenim obrtnim momentom pokreće radnu mašinu čiji otporni momenat ima stalnu vrijednost, a zatim neku drugu radnu mašinu kod koje otporni momenat ovisi o brzini vrtnje. Sve tri krivulje unesene u koordinatni sistem predstavljene su na sl. 2.42.

Sa slike se vidi da je u trenutku pokretanja pokretni momenat motora M_{po} veći od otpornog momenta tereta obje radne mašine, tako da će motor savladati na sebe priključen teret i početi se okretati.

Tačke u kojima krivulja obrtnog momenta motora presijeca krivulje otpornih momenata tereta nazivamo radne tačke. Za radnu mašinu čiji otporni momenat ne ovisi o promjeni brzine, odnosno ima stalnu vrijednost, radna tačka nalazi se u tački D. Otporni momenat predstavljen je pravcem paralelnim sa apscisnom osom. U tački D brzina motora se ustalila, jer momenat M koji proizvodi motor drži ravnotežu momentu tereta M_t.

Motor opterećen teretom čija krivulja otpornog momenta ovisi o promjeni brzine, u našem primjeru presijeca krivulju obrtnog momenta motora u tački C. To je radna tačka u kojoj se motor vrti stalnom brzinom i ima određeno klizanje

s_1. Kod ovog klizanja s_1 rad motora je stabilan, jer je pri svakom slučajnom malom povećanju klizanja $s>s_1$ razlika momenata pozitivna $M-M_t>0$, i nastoji povećati brzinu motora, a smanjiti klizanje na njegovu raniju vrijednost. Obrnuto, kod $s<s_1$ razlika momenata je negativna $M-M_t<0$, pa će motor biti kočen dok klizanje ne dostigne raniju vrijednost s_1.

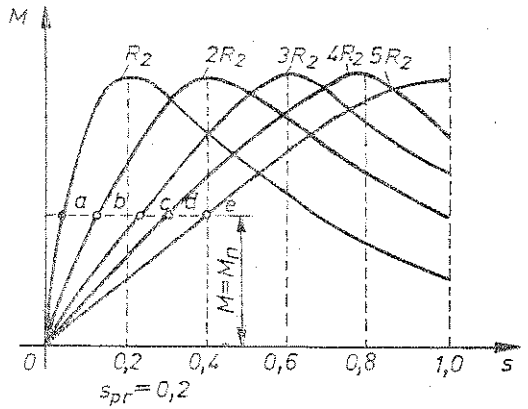
Svaki asinhroni motor može se naći u više pogonskih stanja, počevši od tačke D do prekretne tačke B u kojoj je motor maksimalno opterećen. Ako je npr. u tački C pogonsko stanje u kojem motor razvija nominalni momenat M_n, onda je u svim ostalim pogonskim stanjima u kojima se radne tačke nalaze između C i B motor preopterećen. Motor će sve terete do prekretne tačke B savladati. Ukoliko se momenat tereta još više poveća, motor neće moći da razvije takav momenat koji će biti u stanju da ga savlada i on će stati. To je momenat kada je motor zaustavljen pod opterećenjem (kratak spoj motora) koji je vrlo opasan i ako potraje duže vremena, doći će do uništenja namotaja i izolacije (pregorjeće).

Da zaključimo: na krivulji obrtnog momenta asinhronog motora $M=f(s)$ imamo dva područja. Prvi dio je između mirujućeg stanja ($s=1$), tj. od pokretnog momenta u tački A do prekretnog momenta u tački B koji nazivamo *nestabilni dio*. Drugi dio krivulje između prekretne tačke B do sinhronizma $s=0$ naziva se *stabilni dio*. Znači, ovaj dio krivulje pri kome je vrijednost klizanja mala odgovara normalnom radu asinhronog motora.

Ako se radi o teškim načinima pokretanja (npr. pokretanje uz puno opterećenje ili pokretanje mehanizama s velikim zamašnim masama), potrebno je da pokretni momenat bude maksimalan. To možemo postići kada se ispuni uslov $s_{po}=1$. Tada je $R_2/X_2\approx 1$ ili $R_2\approx X_2$. Znači, motor pri pokretanju razvija najveći momenat onda kada je aktivni (omski) otpor jednak induktivnom otporu kola namotaja rotora i on je jednak prekretnom momentu. Normalne motore gradimo sa što manjim omskim otporom R_2 (manji gubici!) i on je nekoliko puta manji od induktivnog otpora X_2. Možemo dakle kazati: što je manji otpor R_2 u odnosu na X_2, to je manji pokretni momenat.

Da bismo dobili maksimalni pokretni momenat asinhronog motora, u kolo namotaja rotora preko kliznih prstenova priključujemo otpornike i na taj način vještački povećavamo otpor kola rotora R_2.

Tako dobijemo više krivulja tzv. „familiju krivulja", kako je to predstavljeno na sl. 2.43, gdje su nacrtane karakteristike momenata za motor čiji je odnos aktivnog i induktivnog otpora $R_2/X_2=0{,}2$, kojem se dodatnim otporom ukupni aktivni otpor rotorskog kola povećava na $2R_2$, $3R_2$, $4R_2$ i $5R_2$. Sa slike nije teško uočiti da je prekretni momenat stalan, bez obzira na veličinu dodatnih otpora, dok pokretni



Sl. 2.43. Krivulje momenata $M=f(s)$ pri raznim vrijednostima aktivnih (omskih) otpora u kolu namotaja rotora

momenat postaje veći uključivanjem veće vrijednosti otpora. U našem primjeru lako uočavamo da je kod motora s tzv. prekretnim klizanjem $s_{pr}=0{,}2$ i petorostrukim otporom rotorskog namotaja $5R_2$ pokretni momenat jednak prekretnom momentu.

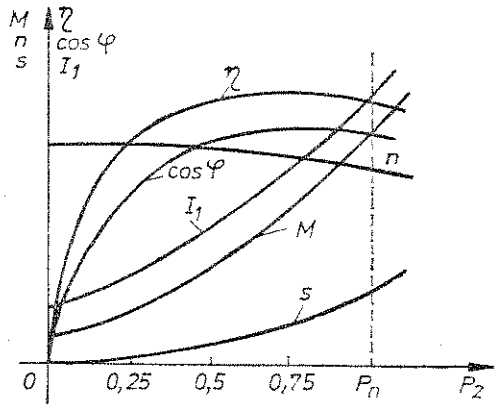
Kako se izvodi operacija pokretanja asinhronog motora? U momentu uključenja, tj. na prvom stepenu otpornika uključeni su svi dodatni otpori, pa je $M_{po}=M_m$ i prema tome vrijedi krivulja momenta $5R_2$. Kada motor počinje da se vrti i čekajući dok se klizanje ne smanji do $s\approx 0{,}8$, isključujemo dio otpornika, tj. prelazimo na drugi stepen i prema tome na krivulju momenta $4R_2$; zatim pri $s\approx 0{,}6$ prelazimo na treći stepen otpornika i krivulju momenata $3R_2$; potom pri $s\approx 0{,}4$ prelazimo na drugi stepen otpornika i krivulju momenta $2R_2$ i na kraju, sasvim isključujemo otpornik i prelazimo na krivulju momenta R_2 kada motor radi samo s vlastitim aktivnim otporom rotorskog namotaja. Tačka a na krivulji R_2 predstavlja stabilan rad motora.

Još da kažemo da povećanjem momenta pokretanja, uključenje otpornika u kolo namotaja rotora omogućava i smanjenje struje pokretanja I_{po}, o čemu će biti govora kasnije.

* * * * * * * * *

2.4.5. Radne karakteristike asinhronog motora

Dosadašnjim proučavanjem asinhronih motora uočili smo sve njihove za rad značajne električne i mehaničke veličine. To su: broj okretaja n, obrtni momenat M, klizanje s, stepen korisnog djelovanja η, faktor snage $\cos\varphi$, kao i struja koju on vuče iz mreže I_1. Sve ove karakterističke veličine su funkcije korisne snage P_2. Ako njihovo mijenjanje predstavimo u koordinatnom sistemu, zavisno od mijenjanja korisne snage, dobićemo odgovarajuće krivulje koje će predstavljati sliku ponašanja odnosnih karakterističnih veličina motora, tj. dobićemo *radne karakteristike*. Izgled pojedinih radnih karakteristika asinhronih motora normalnog tipa (koje se inače crtaju svaka u svom mjerilu) dat je na sl. 2.44. Radne karakteristike motora su inače od velikog značaja, jer se prema njima utvrđuju svojstva motora za razne pogonske prilike. Dobivamo ih neposrednim ispitivanjem mašine pod opterećenjem i direktnim mjerenjem svih veličina koje nas zanimaju.



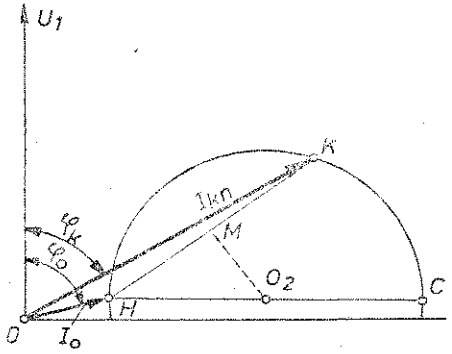
Sl. 2.44. Radne karakteristike asinhronog motora

2.4.6. Kružni dijagram asinhronog motora

Dobijanje radnih karakteristika opterećenog motora zahtijeva često veoma glomazne aparature, oduzima mnogo vremena, izaziva gubitak energije i što je najvažnije kod motora srednje i veće snage ne odgovara uvijek potrebama neophodne tačnosti. Zato radne karakteristike asinhronog motora utvrđujemo jednostavnije posrednim putem pomoću tzv. *kružnog dijagrama*. On se može konstruisati na osnovu samo dva jednostavna pokusa: pokusa praznog hoda i pokusa kratkog spoja.

Ovi pokusi su jednostavni i trebaju relativno malo vremena i utroška energije. Rezultati koje dobijemo pomoću kružnog dijagrama malo se razlikuju od rezultata dobijenih neposrednim mjerenjem i sasvim su tačni, za praktične svrhe. Osim toga, kružni dijagram daje mogućnost jednostavnog i preglednog razmatranja uticaja pojedinih faktora na radni proces asinhronog motora.

Da bismo nacrtali pojednostavljeni kružni dijagram asinhronog motora, potrebno je odrediti koordinate dvaju tačaka. To su: tačka praznog hoda H i tačka kratkog spoja K, kako je prikazano na sl. 2.45. Podatke za ove dvije tačke kao i ostale potrebne podatke dobivamo na osnovu pokusa praznog hoda i kratkog spoja.



Sl. 2.45. Pojednostavljeni kružni dijagram asinhronog motora

Pokus praznog hoda izvodimo pri nominalnom linijskom naponu U_1 i nominalnoj frekvenciji f. Struja I_0 zaostaje za uglom $\varphi_0\approx 90°$. Snagu asinhronog motora u praznom hodu dobivamo izrazom:

$$P_0=3I_{0f}^2R_1+\Delta P_{Fe}+\Delta P_{meh}+\Delta P_d \qquad \ldots\ldots (2.63)$$

Na osnovu toga dobivamo:

$$\cos\varphi_0=\frac{P_0}{3U_{1f}I_{0f}}=\frac{P_0}{\sqrt{3}\,U_1I_0} \qquad \ldots\ldots (2.64)$$

Pošto smo ustanovili vrijednosti za I_0 i $\cos\varphi_0$, crtamo tačku praznog hoda H. Prilikom izvođenja pokusa praznog hoda napon doveden asinhronom motoru U_1 mijenjamo u granicama od 0,7 U_n do 1,2 U_n i prema tim podacima crtamo krivulje $I_0=f(U_1)$ i $P_0=f(U_1)$. I pomoću ovih krivulja možemo doći do vrijednosti I_0 i P_0 pri $U_1=U_n$.

Pokus kratkog spoja izvodimo pri zakočenom rotoru uz sniženi napon kratkog spoja U_k doveden na stator motora pri nominalnoj frekvenciji f. Sniženi napon U_k obično iznosi 15 do 25% nominalnog napona U_n. Ako bismo pokus krat-

kog spoja izveli pri nominalnom naponu U_n, struja kratkog spoja imala bi veliku vrijednost i iznosila bi $I_k = 4 \div 7\ I_n$.

Pod uslovom da su ostale veličine kratkog spoja stalne, zavisnost struje $I_k = f(U_k)$ predstavlja pravac. Zato se izračunati podaci kratkog spoja, dobiveni pri sniženom naponu U_k, svode na podatke za nominalni napon U_n pomoću formule:

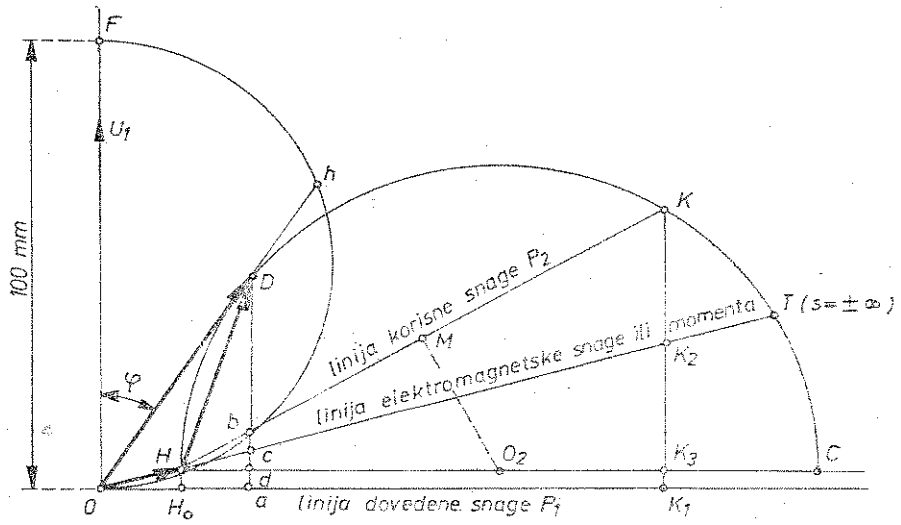
$$I_{kn} = I_k \frac{U_n}{U_k} \qquad \ldots\ldots (2.65)$$

Budući da su otpori R_k i X_k stalni, ugao φ_k se pri preračunavanju ne mijenja i on iznosi:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3 U_{kf} I_{kf}} = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_k I_k} \qquad \ldots\ldots (2.66)$$

Pošto smo utvrdili vrijednosti za I_k i $\cos \varphi_k$, crtamo tačku kratkog spoja K. Dobivene tačke H i K spajamo pravcem $\overline{HK}$ iz čijeg središta spuštamo okomicu MO_2 do presjecišta s pravcem $\overline{HC}$, povučenim iz tačke praznog hoda H paralelno s apscisnom osom. Tako dobivamo centar kruga struja O_2. Tako smo dobili pojednostavljeni kružni dijagram asinhronog motora (sl. 2.45).

Da bismo konstruisali kompletan kružni dijagram asinhronog motora uvešćemo mjerilo za struju označeno malim slovom a (A-jedinica za struju). Uvedenim mjerilom za struje I_0 i I_k i prema podacima iz pokusa praznog hoda i kratkog spoja nacrtajmo tačke H i K (sl. 2.46). Sve ostale radnje ponovimo kao na prethodnoj slici.



Sl. 2.46. Kružni dijagram asinhronog motora. Legenda: $\overline{OD} = I_1$; $\overline{OH} = I_0$; $\overline{HD} = I_2$; $\overline{Da} = I_{1a}$; $\overline{Da} = P_1$; $\overline{Db} = P_2$; $\overline{K_1K_3} = \overline{H_0H} = P_0$; $P'_k = \overline{KK_3}$; $P_{2Cu} = \overline{KK_2} = P_{1k}$; $P_1 = \overline{Da}$; $P_2 = \overline{Db}$; $P_{em} = \overline{Dc}$; $P_{Cu} \approx \overline{ad}$; $P_{1Cu} = \overline{cd}$; $P_{2Cu} = \overline{bd} - \overline{cd} = \overline{bc}$

Na dobivenom krugu struja odaberimo proizvoljno tačku D. Nju spajamo pravcima s tačkama O i H i tako dobivamo trougao ODH čije nam stranice predstavljaju: $\overline{OH} = \frac{I_0}{a}$; $I_1 = a\overline{OD}$; $I_2 = a\ \overline{HD}$, gdje je $a\left(\frac{A}{mm}\right)$ mjerilo za struju.

Faktor snage $\cos \varphi$. Pomoću kruga struja određujemo faktor snage $\cos \varphi$ za neku vrijednost struje I_1. To činimo na taj način što na ordinatnoj osi označimo dužinu $\overline{OF} = 100$ mm i na njoj, kao dijametru, nacrtamo polukrug. Produžavanjem vektora $\overline{OD}$ do presjecišta s tim polukrugom dolazimo do nove tačke h. Mjerenjem dužine $\overline{Oh}$ dobivamo:

$$\cos \varphi = \frac{Oh}{OF} = \frac{Oh\ (\text{mm})}{100\ \text{mm}} \qquad \ldots\ldots (2.67)$$

Linija dovedene snage P_1. Snaga koju trofazni asinhroni motor uzima iz mreže je:

$$P_1 = 3 U_{1f} I_{1f} \cos \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi \qquad \ldots\ldots (2.68)$$

Uz napon U_1 čija je vrijednost stalna, snaga P_1 dovedena motoru proporcionalna je aktivnoj komponenti struje statora $I_1 \cos \varphi = I_{1a}$. Na sl. 2.46. struja $I_{1a} = \overline{Da}$, gdje je $\overline{Da}$ okomica spuštena iz tačke D na apscisnu os. Prema tome, u kružnom dijagramu snaga P_1 za bilo koju vrijednost struje I_1 proporcionalna je dužini okomice $\overline{Da}$. Na taj način, dužina okomice $\overline{Da}$ izmjerena u mjerilu struje a i pomnožena sa $q_1 U_1$ predstavlja snagu P_1. Dakle:

$$P_1 = q_1 U_1 I_1 \cos \varphi = q_1 U_1 a \overline{OD} \cos \varphi = q_1 U_1 \overline{Da} = w \overline{Da}, \qquad \ldots\ldots (2.69)$$

gdje je $w = q_1 U_1 a$ (W/mm) mjerilo za snagu.

Pri promjeni opterećenja tačka D se pomiče po krugu struja, a tačka a klizi po apscisnoj osi. U kratkom spoju tačka D dolazi u tačku K, a tačka a u tačku K_1. U praznom hodu tačka D prelazi u tačku H, a tačka a u tačku H_0. Ukoliko bi se tačka D spustila na apscisnu os, onda bi snaga P_1 bila jednaka nuli ($P_1 = 0$). Zbog toga se dovedena snaga računa uvijek od apscisne ose i zato se ona naziva linija dovedene snage P_1.

Linija korisne snage P_2. Korisna snaga rotora P_2, tj. snaga koju razvija obrtni momenat data je već poznatim izrazom (2.39) $P_2 = M\omega$. Vrijednost te snage biće jednaka nuli u dva slučaja: pri praznom hodu ($M = 0$) u tački H i pri kratkom spoju ($\omega = 0$) u tački K. Pravac koji prolazi tačkama H i K predstavlja liniju korisne snage P_2. Za zadanu struju $I_1 = \overline{OD}$ snaga P_2 predstavljena je dužinom $\overline{Db}$ na okomici $\overline{Da}$. Mjerilo korisne snage P_2 određujemo kao i ranije, tj. dužinu $\overline{Db}$ izmjerenu u mjerilu struje množimo sa $q_1 U_1$ i dobivamo snagu $P_2 = w\overline{Db}$.

Linija elektromagnetske snage P_{em} **ili momenta na osovini motora** M. Linija elektromagnetske snage P_{em} jeste pravac koji prolazi kroz dvije tačke na krugu struja u kojima je elektromagnetska snaga jednaka nuli. Pošto elektromagnetskom nazivamo onu snagu koja se obrtnim magnetskim poljem prenosi na rotor, jasno je da će vrijednost te snage biti jednaka nuli kada se rotor vrti sinhrono s obrtnim poljem ($s = 0$), (rotor ubrzavamo do sinhrone brzine nekim drugim motorom). Zanemarujući mehaničke gubitke, utvrđujemo da će se tačka sinhrone brzine poklopiti s tačkom praznog hoda H, što znači da će tačka H biti ujedno i tačka praznog hoda i tačka njegove sinhrone brzine.

Druga tačka u kojoj je vrijednost elektromagnetske snage jednaka nuli jeste tačka u kojoj se rotor vrti beskonačnom brzinom ($s=\pm\infty$). Tačku sa beskonačnim klizanjem pokusom je nemoguće postići, pa ćemo se za određivanje druge tačke koristiti podacima o kratkom spoju. Snaga kratkog spoja P_k uglavnom se troši na savladavanje gubitaka u bakru namotaja statora i rotora. Pošto su gubici u željezu statora i rotora vrlo mali, s dovoljnom tačnošću ih možemo odrediti pri kratkom spoju dužinom $w\overline{K_1K_3}=w\overline{H_0H}=P_0$.

Zato je:

$$P'_k=P_k-P_0=w\overline{KK_3}=P_{1Cu}+P_{2Cu}.$$

Iz energetskog dijagrama (sl. 2.34) se vidi da se pri kratkom spoju cjelokupna elektromagnetska snaga predata rotoru troši na savladavanje gubitaka u bakru njegova namotaja. Stoga je:

$$P_{1k}=P_{2Cu} \qquad \ldots\ldots (2.70)$$

Linija elektromagnetske snage P_{em} praktički se određuje tako što od snage kratkog spoja $P'_k=w\overline{KK_3}$ oduzmemo gubitke u bakru namotaja statora $P_{1Cu}=w\overline{K_3K_2}$. Tada nam dužina $\overline{KK_2}$ predstavlja gubitke u bakru namotaja rotora P_{2Cu}, a prema tome i snagu P_{1k}. Povlačenjem pravca kroz tačke H i K_2 na krugu struja dobivamo tačku T, koja odgovara klizanju $s=\pm\infty$.

Za zadanu struju $I_1=a\overline{OD}$ snaga P_{em} predstavljena je dužinom $\overline{Dc}$ na okomici $\overline{Da}$. Njeno mjerilo određujemo tako što dužinu $\overline{Dc}$ pomnožimo mjerilom za snagu i tako dobivamo elektromagnetsku snagu P_{em}.

Pošto je $P_{em}=M\omega_1$ (2.38), to je pri stalnoj frekvenciji f i ugaona brzina ω_1 stalna, pa je prema tome $P_{em}\sim M$. Dakle, prema izloženom, liniju elektromagnetske snage često nazivamo i linijom momenta motora. Njegov izraz biće:

$$M=\frac{P_{em}}{\omega_1}=\frac{P_{em}}{\frac{2\pi f_1}{p}}=\frac{p}{2\pi f_1}P_{em}.$$

Gubici snage. Na kružnom dijagramu gubici snage određuju se dužinama na okomici $\overline{Da}=P_1$. Dužina $\overline{HH_0}$ predstavlja snagu praznog hoda čiju vrijednost možemo odrediti i pomoću formule:

$$P_0=3I_{01}^2R_1+P_{Fe}+P_{meh}+P_d \qquad \ldots\ldots (2.71)$$

Pošto se pri povećanju opterećenja gubici snage u željezu statora i mehanički gubici snage u rotoru smanjuju, a gubici snage u željezu rotora povećavaju, zaključujemo da snaga praznog hoda P_0 ne zavisi od opterećenja, tj.

$$P_0=w\overline{HH_0}=w\overline{ad}=\text{const}.$$

Ako od dovedene snage $P_1=\overline{Da}$ oduzmemo korisnu snagu $P_2=w\overline{Db}$ i snagu praznog hoda $P_0=\overline{da}$ dobivamo sumu gubitaka snage u bakru statora i rotora. Dakle:

$$P_{1Cu}+P_{2Cu}=P_1-P_2-P_0=w(\overline{Da}-\overline{Db}-\overline{da})=w\overline{bd}.$$

Odranije nam je poznato (sl. 2.34) da je $P_{em}=P_1-P_{1Cu}-P_{2Fe}$. Za zadanu struju $I_1=a\overline{OD}$ dobivamo: $P_1=w\overline{Da}$, $P_{em}=w\overline{Dc}$ i $P_{Cu}\approx w\overline{ad}$. Iz ovoga izlazi da je:

$$P_{1Cu}=w\overline{cd} \text{ i } P_{2Cu}=w(\overline{bd}-\overline{cd})=w\overline{bc}.$$

Mjerilo uzimamo kao i ranije!

Klizanje asinhronog motora s. Klizanje možemo izraziti obrascem

$$s=\frac{P_{2Cu}}{P_{em}}=\frac{w\overline{bc}}{w\overline{Dc}}=\frac{\overline{bc}}{\overline{Dc}} \qquad \ldots\ldots (2.72)$$

Iz kružnog dijagrama se vidi da je $P_{2Cu}=w\overline{bc}$ i $P_{em}=w\overline{Dc}$. Uvrštavanjem dužina $\overline{bc}$ i $\overline{Dc}$ uzetih u mjerilu u gornju formulu dobivamo vrijednost klizanja asinhronog motora.

Stepen korisnog djelovanja η. Iz već poznatog odnosa

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}=\frac{w\overline{Db}}{w\overline{Da}}=\frac{\overline{Db}}{\overline{Da}}$$

lako možemo izračunati stepen korisnog djelovanja. Iz kružnog dijagrama uzimamo već utvrđene veličine korisne snage $P_2=w\overline{Db}$ i dovedene snage $P_1=w\overline{Da}$ i uvrštavamo u gornji izraz. Ovakav način određivanja stepena korisnog djelovanja nije precizan, pa se češće primjenjuje analitička (računska) metoda. To je metoda kojom se analitički utvrđuju gubici snage.

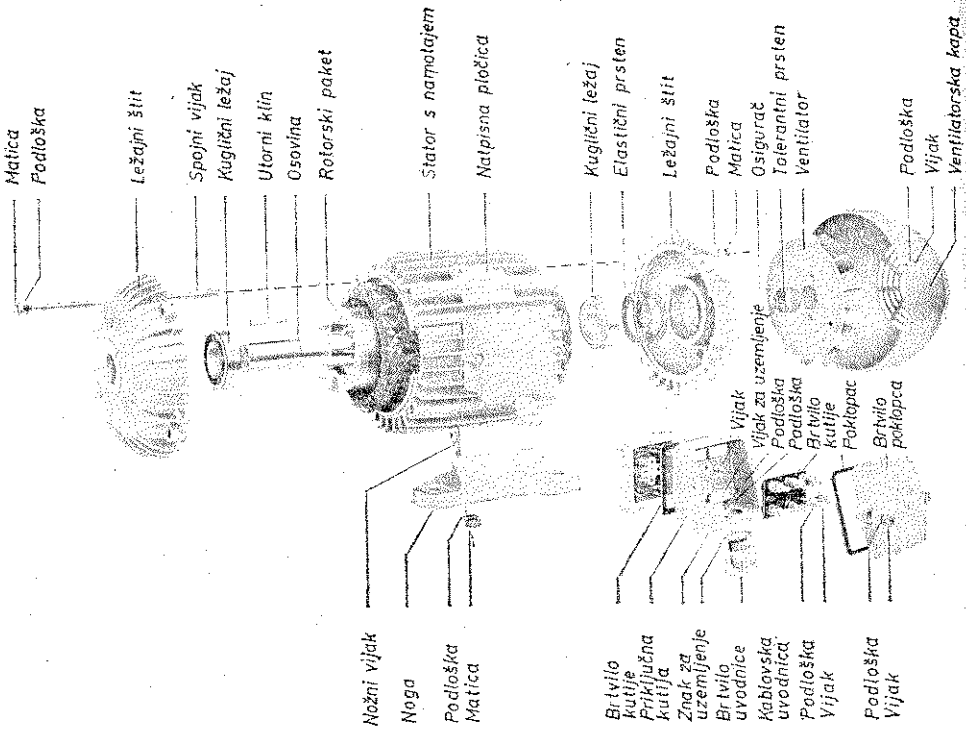
* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

1. Objasni šta se dešava u neopterećenom asinhronom motoru!
2. Od čega zavisi obrtni (zakretni) momenat asinhronog motora?
3. Koji momenat asinhronog motora nazivamo pokretni, a koji prekretni?
4. Od čega zavisi veličina pokretnog momenta asinhronog motora?
5. Šta podrazumijevamo pod stabilnošću rada asinhronog motora u pogonu?
6. Na koji način možemo dobiti maksimalan pokretni momenat asinhronog motora?
7. Nabroj radne karakteristike asinhronog motora, predstavi ih u koordinatnom sistemu i kaži šta nam one pokazuju!
8. Objasni ukratko kako dobivamo kružni dijagram asinhronog motora i u čemu je njegov značaj!

2.5. KONSTRUKTIVNA IZVEDBA ASINHRONIH MOTORA

Iz mnoštva dijelova trofaznog asinhronog motora predstavljenih na sl. 2.47. izdvojićemo one najvažnije. To su *stator i rotor*.

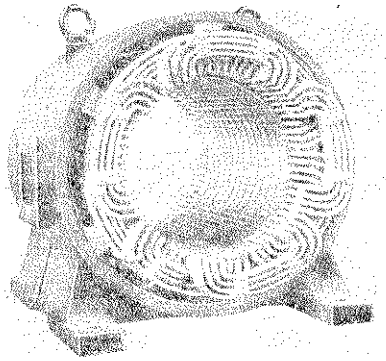


Sl. 2.47. Trofazni asinhroni motor rastavljen na dijelove. Proizvođač „Elektrokovina" Maribor

2.5.1. Stator

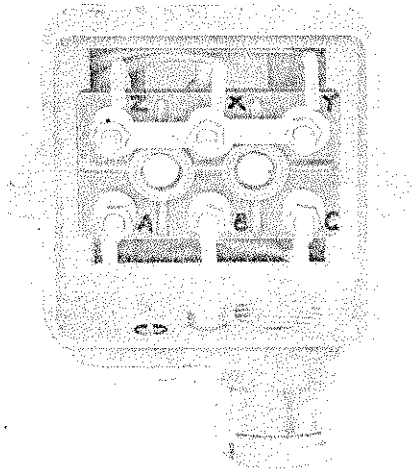
Stator je nepokretni dio motora i ima oblik šupljeg valjka (sl. 2.48). Sastoji se od tri dijela: *kućišta, jezgre* i *namotaja*.

Kućište. To je dio statora koji s unutrašnje strane nosi magnetska jezgra i namotaje. S obje bočne strane kućišta ugrađeni su ležajevi za osovinu rotora. Kućište je izrađeno od lijevanog željeza i valjanog čelika, a u posljednje vrijeme od kvalitetne aluminijske legure, tzv. silumina. Na njemu je smještena priključna kutija(ploča) (sl. 2.49) na koju su dovedeni krajevi faznih namotaja statora i služi da se preko nje motor priključuje na mrežu. Ploča je izrađena od izolacionog materijala npr. pertinaksa.

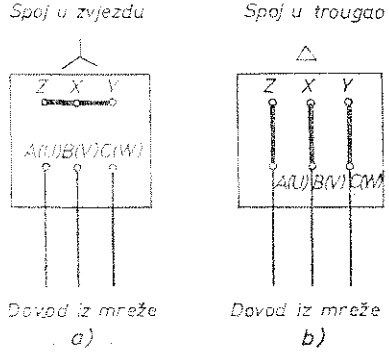


Sl. 2.48. Stator trofaznog asinhronog motora

Kod trofaznog asinhronog motora u priključnoj kutiji nalazi se šest priključnih zavrtanja (stezaljki). Zavrtnji na koje su dovedeni počeci faznih namotaja označeni su sa *A*, *B* i *C* ili (*U*, *V*, *W*—stare oznake), a zavrtnji koji su vezani za završetke faznih namotaja imaju oznake *X*, *Y* i *Z*. Na sl. 2.50. predstavljeni su shematski zavrtnji koji se na lak način mogu spojiti tako da namotaji statora čine spoj zvijezda



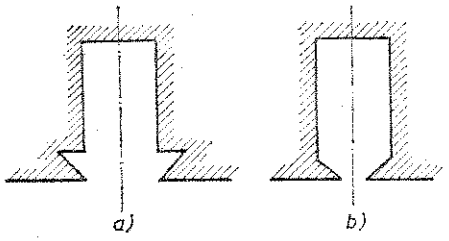
Sl. 2.49. Izgled priključne kutije (bez poklopca)



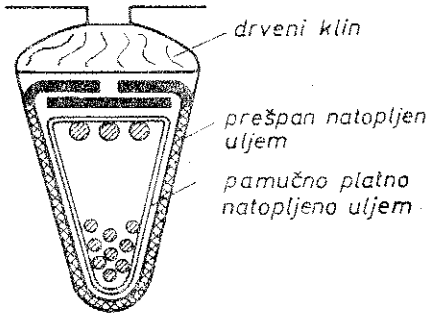
Sl. 2.50. Spajanje namotaja statora a) u zvijezdu i b) u trougao

(sl. 2.50a) ili spoj trougao (sl. 2.50b). Kada su namotaji statora motora spojeni u zvijezdu, onda je napon na tim namotajima 220 V, a kada su spojeni u trougao, onda je napon 380 V.

Jezgra statora je onaj dio mašine kroz koji se zatvara magnetski tok i na kome se nalazi statorski namotaj. Napravljen je od legiranog čeličnog lima, tzv. dinamo-limova, čija se debljina kreće od 0,5 do 1 mm. Jezgra je sastavljena od limova iz istih razloga kao kod transformatora. Lim je izolovan papirom sa jedne strane debljine 0,03 mm ili lakom sa obje strane debljine 0,025 mm. Izolacije može da bude vodeno staklo i oksid. Iz limova se isijecaju kružni prstenovi koji na svom unutrašnjem obodu imaju isječene utore. Ti limovi se slažu tako da dobivamo pakete limova koji se pričvršćuju i spajaju sa kućištem. Utori statorskih jezgri izvode se kao otvoreni i poluzatvoreni, kako je to prikazano na sl. 2.51.



Sl. 2.51. Utori statorskog jezgra: a) otvoreni, b) poluzatvoreni.



Sl. 2.52. Presjek utora statora s namotajem i izolacijom

Namotaji. O izvođenju višefaznih namotaja govorili smo ranije. Još da kažemo da se kod otvorenih utora svici izrađuju na šablonu izvan mašine, pa ih onda gotove i ukrućene smještamo u utore. Takva vrsta namotaja, s obzirom na način izvedbe, naziva se šablonski namotaj. Kod poluzatvorenih utora svici se također izrađuju na šablonu, ali je njihova izvedba „meka" radi lakšeg stavljanja u utore. To činimo na taj način što kroz suženo grlo utora stavljamo odjednom jednu ili više žica. To je tzv. „usipni" namotaj.

Za formiranje namotaja upotrebljavaju se provodnici koji su napravljeni od mekog elektrotehničkog bakra specifične provodnosti 58 Sm/mm². Najčešće se upotrebljava žica okruglog presjeka standardnog promjera do 1,5 mm. To je tzv. dinamo-žica oznake *L*. Za veće presjeke izrađuje se dinamo-žica koja je preko laka obavijena sa dva sloja pamuka u suprotnim smjerovima. Označava se sa *LPP*. Ukoliko je žica bez laka, onda je oznaka *PP*. Izrađuju se u standardnim promjerima od 0,1 do 6 mm. Kod motora većih snaga upotrebljava se i žica pravougaonog presjeka. Obavijena je samo pamukom, a ponekad ispod pamuka ima još i papir.

Pored izolacije žice, potrebno je izvršiti i izolaciju pojedinih strana svitaka u utorima od željezne jezgre. Izolacija je obično prespan debljine do 0,7 mm. Zbog zaštite namotaja, izolacija u utoru prema željeznoj jezgri mora biti duža od paketa

lima (po prilici 5 mm izvan utora sa svake strane). Kod dvoslojnih namotaja svaka strana svitka u utoru mora imati svoju izolaciju prema željeznoj jezgri. Također, između pojedinih slojeva u utoru stavlja se izolacija od prespana.

Iz izloženog nije teško zaključiti da veći dio površine presjeka utora zauzima bakar, a preostali manji dio ispunjava izolacija ili ostaje neispunjen. Na sl. 2.52. prikazan je presjek utora s namotajem i izolacijom. Odnos između površine neizolovane bakrene žice u površini presjeka utora i ukupne površine utora naziva se faktor punjenja utora. Dakle:

$$f_u = \frac{A_{Cu}}{A_u} \qquad \ldots\ldots (2.73)$$

2.5.2. **Rotor**

Rotor je pokretni dio motora. Ima oblik valjka složenog od međusobno izolovanih dinamo-limova čija su svojstva ista kao i kod jezgre statora. S vanjske strane rotora nalaze se utori u koje se smještaju namotaji. Rotor se nalazi u unutrašnjosti statora i svojom osovinom se oslanja na dva nepokretna ležišta, tako da se može okretati.

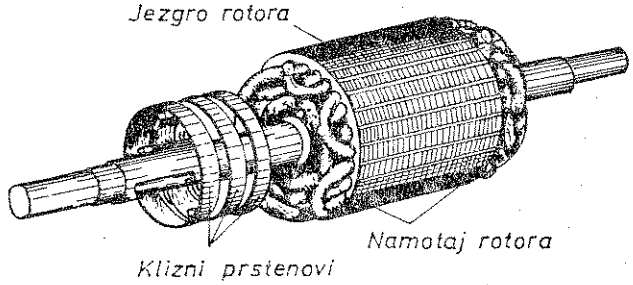
Dinamo-limovi su isječeni utorima i otvorom za osovinu. Kod motora većih snaga prave se i ventilacioni kanali radi prolaza rashladnog vazduha. Tako isječeni limovi slažu se na osovinu u „paket" potrebne osne dužine. Paket limova potrebno je dobro stegnuti, tako da postane kompaktna cjelina. To postižemo pomoću izolovanih vijaka (kao kod transformatora) ili posebnim konstruktivnim dodacima od nemagnetskog materijala.

Zadatak rotorskog paketa je da nosi u utorima namotaj, da dobro provodi magnetski tok te da elektromagnetsku silu kojom namotaj djeluje na zupce prenosi na osovinu rotora. Pored toga, rotorski paket mora biti napravljen tako da prilikom vrtnje izdrži sve centrifugalne sile. Dakle, najviše su opterećeni zupci utora, jer pri vrtnji namotaj nastoji da izleti iz utora, a pošto je učvršćen u utoru, sva centrifugalna sila djeluje na tijelo zupca.

Namotaj rotora može da bude izveden na dva načina, pa tako dobivamo:

— *rotor s kliznim prstenovima* ili *kolutima*,

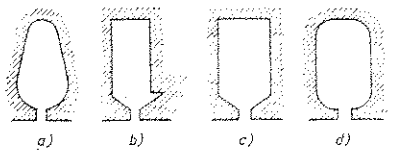
— *kratkospojeni* ili *kavezni rotor*.



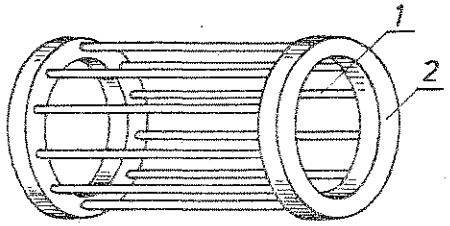
Sl. 2.53. Rotor s kliznim prstenovima

Rotor s kliznim prstenovima prikazan je na sl. 2.53. Upotrebljava se kod asinhronih motora većih snaga. Namotaj se izvodi isto kao i statorski, tj. svici se ulažu u utore i najčešće se spajaju u zvijezdu. Krajevi namotaja su izvedeni na tri klizna prstena koji se nalaze pored rotora na istoj osovini. Prstenovi su međusobno i u odnosu na osovinu izolovani. Na njih naliježu ugljene četkice koje su sa tri provodnika povezane sa tri fazna otpornika koji služe kao pomoćna naprava, koja nije ništa drugo nego jedan trofazni otpornik, o čijoj ulozi će biti kasnije govora.

Utori rotora izvode se kao zatvoreni, poluzatvoreni i otvoreni. Utori za namotaj rotora s kliznim prstenovima imaju različit oblik od utora kratko spojenog rotora. Na sl. 2.54. predstavljeni su oblici utora za namotaj rotora s kliznim prstenovima. Oblik utora pod *a* upotrebljava se za asinhrone motore malih snaga. Namotaj se sastoji od provodnika kružnog presjeka koji se smještaju u utore usipanjem. Kako se sa crteža vidi, utori su poluzatvoreni i potrebno ih je zatvoriti drvenim klinom. Za štapaste provodnike pljosnatog oblika upotrebljava se utor pod *b*. Utori pod *c* i *d* upotrebljavaju se za namotaje rotora koji se izvode provlačenjem.

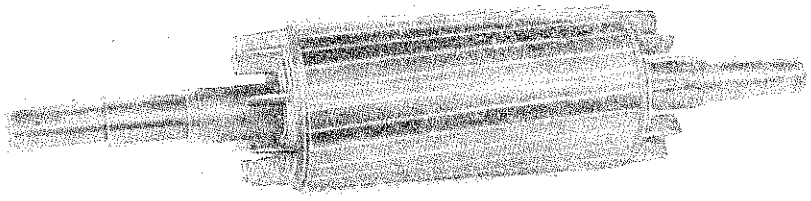


Sl. 2.54. Utori rotora s kliznim prstenovima



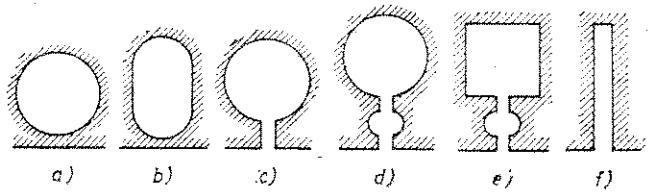
Sl. 2.55. Rotor kratkospojen: 1 — štapovi (šipke), 2 — prstenovi.

Kratkospojene rotore imaju asinhroni motori malih snaga. Namotaji su zamijenjeni golim bakarnim (mjedenim ili brončanim) okruglim štapovima (šipkama) smještenim u utore rotora. S obje strane štapovi su povezani sa prstenovima tako da obrazuju tzv. „kavez" (krletku), kako je prikazano na sl. 2.55. Štapovi i prstenovi koji su napravljeni od istog materijala spajaju se zavarivanjem ili tvrdim lemljenjem. Oni su u utorima izolovani prema limovima prespanom ili mikafolijom. Često su štapovi uvučeni u utore u dva reda, pa dobivamo dvokavezni rotor. Kod asinhronih motora malih i srednjih snaga namotaj rotora isključivo je izliven od aluminijuma i takav „kavez" predstavlja kompaktnu cjelinu, kako je prikazano na sl. 2.56.



Sl. 2.56. Kratkospojeni rotor „kavez" izliven od aluminijuma

Utori kratko spojenog rotora imaju također razne oblike, kako je predstavljeno na sl. 2.57. Oblik pod *a* upotrebljava se kod kratkospojenih motora malih snaga, dok se ostali upotrebljavaju kod većih kratkospojenih motora.



Sl. 2.57. Utori kratkospojenog rotora

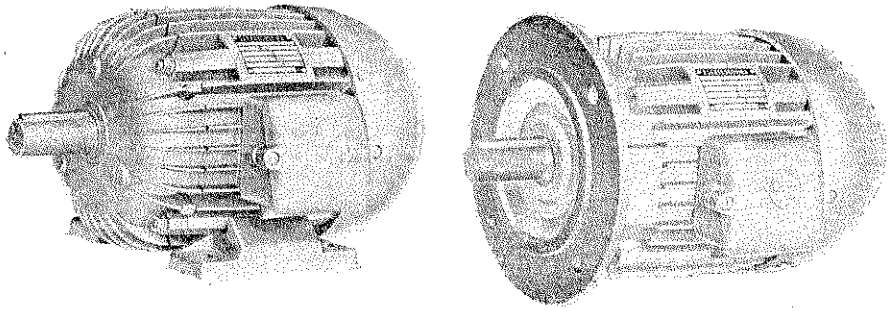
2.5.3. **Pomoćni dijelovi asinhronog motora**

Ventilator se nalazi na osovini izvan kućišta motora. Sastoji se od krilaca koji prilikom vrtnje stvaraju promaju i na taj način odnose toplotu sa površine kućišta (oklopa) koji je često s vanjske strane snabdjeven rebrima radi povećanja površine hladenja.

Poklopci napravljeni od lijevanog željeza zatvaraju motor s jedne i s druge strane. Njihov zadatak je da sprečavaju dodir namotaja i da nose ležišta na koje se oslanja rotorska osovina. Da bi se spriječio dodir s ventilatorom služi ležajni štit koji je utvrđen na poklopcu motora.

Pri radu asinhronog motora dolazi do njegovog zagrijavanja (zbog raznih gubitaka snage). To zagrijavanje ne smije preći određenu granicu da ne bi stradala izolacija. Propisima je utvrđen dozvoljeni porast temperature koji iznosi 65°C. Kao i kod transformatora u obzir uzimamo i temeperaturu prostorije u kojoj motor radi. Ukoliko je temperatura okoline u kojoj motor radi 25°C, onda temperatura ne smije preći granicu od 25+65=90°C.

U prostorijama u kojima ima prašine ili plinova koji mogu da oštete izolaciju ili, pak, tamo gdje ima vlage, prskanja tekućine itd. upotrebljavaju se asinhroni

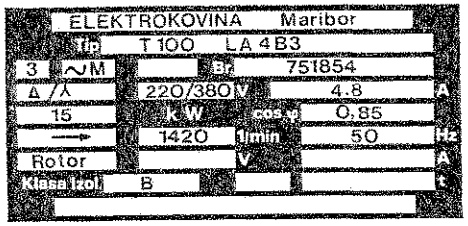


Sl. 2.58. Trofazni asinhroni motor sa kratkospojenim rotorom zatvorene izvedbe

motori posebne konstrukcije kućišta. To su tzv. asinhroni motori zatvorene izvedbe (sl. 2.58). Kod motora manjih i srednjih snaga za hladenje je dovoljan veliki broj rebara na kućištu. Motori velikih snaga hlade se prinudnim strujanjem vazduha.

Motori otvorene izvedbe upotrebljavaju se u prostorijama bez prašine, vlage i plinova.

Natpisna pločica se nalazi na kućištu motora i sadrži najvažnije podatke o njegovom nominalnom radu (sl. 2.59). Ti podaci su:



Sl. 2.59. Natpisna pločica asinhronog motora

— ime proizvodača, npr. Elektrokovina Maribor,

— tip motora, npr. T 100 LA 4 B3.

Tipska oznaka motora nam pokazuje: električnu izvedbu, veličinu po IEC-u, polaritet i oblik motora. Električna izvedba sa slovom „T" znači trofazni kavezni motor. Oznaka za veličinu po IEC-u pokazuje nam i visinu osi osovine motora. Prvo slovo kod oznake dužine kućišta znači dužinu kućišta, dok se drugo slovo dodaje samo u slučaju kada je u kućištu ugrađeno više različitih dugačkih statorskih paketa limova. Brojka 4 označava da je motor sa četiri pola (4-polni). B3 znači osnovni oblik motora.

- vrsta struje, npr. ~ ili —
- način rada
- fabrički broj
- spoj statorskog namotaja, npr. spoj u trougao Δ
- nominalni napon, npr. 220/380 V
- nominalna struja, npr. 4,8 A
- nominalna snaga, npr. 15 kW.

Nominalna snaga je ona koju motor predaje na osovini kod trajnog opterećenja, uz nominalni napon i frekvenciju, pri temperaturi okoline do 40°C i pri nadmorskoj visini do 1 000 m.

- Nominalni faktor snage $\cos\varphi$, npr. $\cos\varphi=0{,}85$,
- nominalna frekvencija, npr. 50 Hz,
- nominalni broj okretaja ili nominalna brzina okretanja, npr. 1420 °/min,
- kod motora s kliznim prstenovima na pločici je unesen i podatak o spoju rotorskog namotaja te napon i struja rotora,
- osim ovih podataka, često se naznačavaju i klasa izolacije, vrsta mehaničke zaštite kao i težina motora.

Svi ovi podaci uneseni u natpisnu pločicu potrebni su onima koji rade sa motorom u pogonu radi eventualnih provjeravanja kao i onima koji vrše popravke, odnosno premotavanja motora.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Koji su osnovni dijelovi asinhronog motora?
2. Opiši stator asinhronog motora i kaži koju ulogu ima svaki njegov dio!
3. Kakva je razlika izmedu rotora sa kliznim prstenovima i rotora u kratkom spoju?
4. Koje podatke sadrži natpisna pločica asinhronog motora?

2.6. PUŠTANJE ASINHRONIH MOTORA U RAD

Iz dosadašnjeg izlaganja smo vidjeli da se namotaj rotora asinhronog motor može izvesti kao statorski namotaj kod koga krajeve spajamo sa kliznim prstenovima kao i sa štapovima koje kratko spajamo. Na osnovu toga zaključujemo da postoje dvije vrste asinhronih motora. To su:

— ASINHRONI MOTORI S KLIZNIM PRSTENOVIMA I
— ASINHRONI MOTORI S KRATKOSPOJENIM ROTOROM.

Obje ove vrste motora ocjenjujemo, odnosno utvrđujemo njihova svojstva za razne pogonske prilike pomoću radnih karakteristika o kojima je ranije bilo govora. Medutim, prilikom puštanja asinhronih motora u rad koristićemo se radnim karakteristikama koje su u uskoj vezi sa tzv. karakteristikama puštanja, odnosno pokretanja.

Puštanje asinhronog motora u rad predstavlja proces koji počinje u momentu priključenja motora na mrežu, a završava se onog momenta kada motor razvije obrtni momenat koji može da savlada momenat tereta koji djeluje na osovini pri odgovarajućoj nominalnoj brzini vrtnje.

Pri puštanju motora pojavljuju se dvije karakteristične veličine od kojih zavisi uspješan završetak procesa puštanja. To su pokretni momenat motora i struja puštanja, tj. struja koju motor povuče iz mreže u trenutku puštanja u rad.

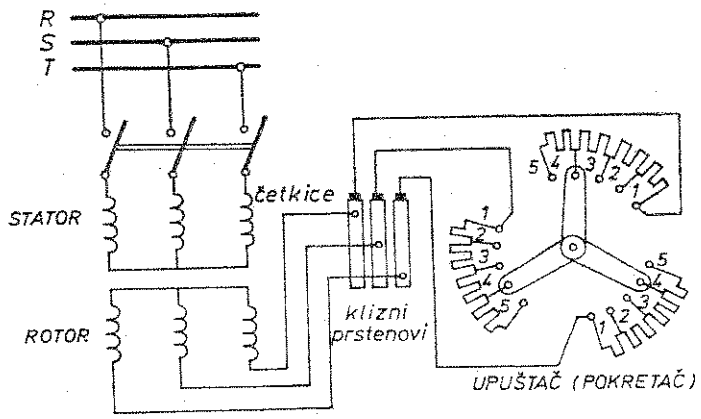
U momentu puštanja u rad vrijednost klizanja asinhronog motora je najveća ($s=1$), kao i brzina kojom obrtni magnetski tok siječe namotaje rotora. Zbog toga će se u tom momentu u rotoru indukovati najveći napon. Pošto struja u rotoru zavisi od ove vrijednosti indukovanog napona i otpora rotora čija je vrijednost mala, jasno je da će ona biti mnogo veća od nominalne. Pošto se asinhroni motor čiji rotor miruje ponaša kao transformator s kratkospojenim sekundarom, njegov će stator iz mreže također povući mnogo veću struju od nominalne (vidi sl. 2.46, radna tačka K).

Velike struje puštanja izazivaju razna električna i mehanička opterećenja i uz preveliko zagrijavanje mogu da dovedu do oštećenja motora. One, također, izazivaju naponske promjene (padove napona) u napojnoj mreži i time utiču na normalan rad ostalih trošila priključenih na tu mrežu.

Da se spriječi (ograniči, smanji) velika vrijednost struje puštanja i ujedno poveća pokretni momenat, poduzimaju se pri puštanju asinhronih motora u rad (naročito motora većih snaga) različite mjere. One ovise o konstruktivnoj izvedbi motora i njegovoj namjeni.

2.6.1. **Puštanje u rad asinhronih motora s kliznim prstenovima**

Da bi istovremeno postigli povećanje pokretnog momenta i ograničenje struje upuštanja, asinhrone motore s kliznim prstenovima puštamo u rad pomoću upuštača (pokretača), kako je prikazano na sl. 2.60.

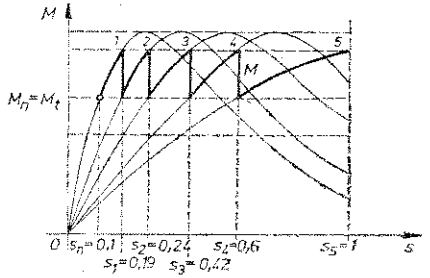


Sl. 2.60. Puštanje u rad asinhronog motora s kliznim prstenovima pomoću upuštača (pokretača)

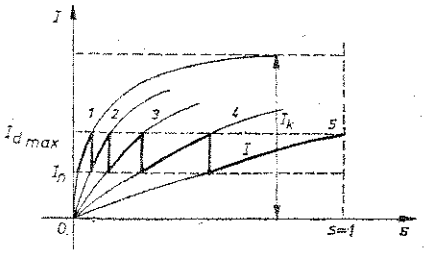
Upuštač nije ništa drugo nego promjenljivi otpornik koji preko četkica i kliznih prstenova spajamo s kolom namotaja rotora. Sa svakim faznim namotajem rotora u seriju je spojen po jedan otpornik. Po izvodima tih otpornika klizi kontakt čijim kretanjem lijevo ili desno vrijednost otpora mijenjamo u stepenima. U momentu puštanja motora u rad ručica promjenljivog otpornika mora biti u takvom položaju da je uključen cijeli otpor (u našem primjeru klizni kontakt je u položaju 5). Kad se motor počeo okretati, ručicu upuštača okrećemo udesno, uz istovremeno pomicanje kliznog kontakta na izvode (4, 3, 2, 1) smanjujući vrijednost otpora upuštača. Onog momenta kada motor postigne nominalni broj okretaja, ručica se nalazi u krajnjem položaju 1, tj. upuštač je isključen. Posebnom napravom na motoru klizni prstenovi se kratko spajaju, a četkice od njih odvajaju.

Na slikama 2.61. i 2.62. prikazane su familije krivulja momenata $M=f(s)$ i struja $I=f(s)$ koje odgovaraju različitim vrijednostima otpora za pojedine stepene upuštača, a debelo su izvučene linije po kojima se za vrijeme napuštanja mijenjaju momenat i struja.

U momentu puštanja motora u rad ($s=1$), kako se sa slika vidi, polazni momenat ima svoju najveću vrijednost, a struja najveću dozvoljenu vrijednost. Čim motor počinje da se vrti (klizanje se smanjuje), vrijednost momenta i struje se smanjuje po krivulji 5. Kada momenat padne na najmanju dozvoljenu vrijednost, a struja na nominalnu vrijednost, tada pomjeranjem ručice upuštača udesno pomjeramo klizni kontakt na izvod 4 i time smanjujemo vrijednost otpora upuštača. Pri tome se momenat ponovo povećava do svoje najveće vrijednosti, dok vrijednost struje ne prelazi dozvoljenu granicu. Za sve vrijeme dok klizni kontakt stoji na izvodu 4, momenat i struja se mijenjaju po krivulji 4. Proces puštanja, odnosno dalje ubrzavanje motora protiče na isti način i pri prelazu kontakta na izvode 3, 2, 1. Na kraju će motor razvijati obrtni momenat koji je potreban da savlada otporni momenat nekog tereta, dok će struja koju vuče iz mreže biti nominalne vrijednosti.



Sl. 2.61. Dijagram promjene momenta asinhronog motora s kliznim prstenovima pri puštanju u rad pomoću upuštača (pokretača). Krivulje momenata pri različitim vrijednostima otpora

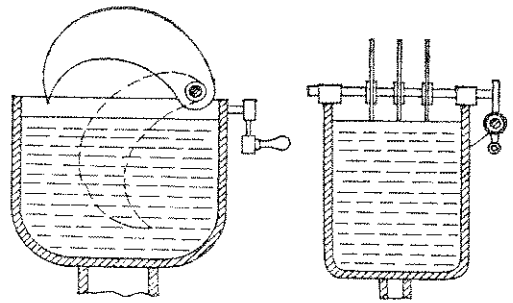


Sl. 2.62. Dijagram promjene struje asinhronog motora s kliznim prstenovima pri puštanju u rad pomoću upuštača. Krivulje struja pri različitim vrijednostima dodatnog otpora

Da zaključimo: pomoću upuštača motor se može pokrenuti uz relativno malu vrijednost struje pokretanja u odnosu prema struji kratkog spoja I_k (sl. 2.62) i velikim obrtnim momentom (sl. 2.61).

Upuštači se izrađuju kao metalni i kao tečni.

Metalni upuštači napravljeni su od žice konstantana, nikelina ili sličnog materijala. Presjek žice zavisi od snage motora koji puštamo u rad, vremena trajanja puštanja u rad kao i broja puštanja u jednom satu. Hlade se vazduhom ili uljem. Ukoliko prostorija u kojoj se nalazi upuštač ima prašine i plinova, onda se on stavlja u posudu s uljem.



Sl. 2.63. Tečni upuštač

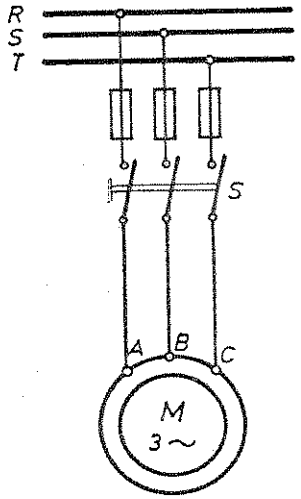
Tečni upuštači upotrebljavaju se za puštanje u rad motora većih snaga. Sastoje se od posude u kojoj se nalazi elektrolit (15%-tni rastvor natrijum-hidroksida NaOH) i tri pomične elektrode, kako je prikazano na sl. 2.63. Elektrode se mogu manje ili više uronjavati u elektrolit. Ukoliko su manje uronjene u elektrolit, otpor je veći, i obratno.

2.6.2. **Puštanje u rad asinhronih motora s kratkospojenim rotorom**

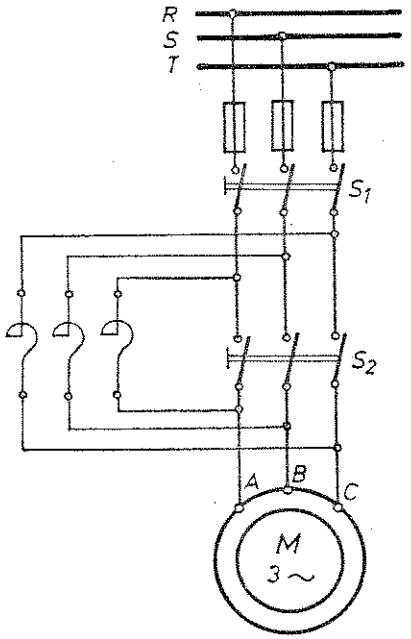
Ima više načina puštanja u rad asinhronih motora s kratkospojenim rotorom. Koji ćemo način izabrati zavisi od nominalne snage motora, od snage električne mreže na koju se motor priključuje, od karakteristika radne mašine koju motor pogoni i od uslova eksploatacije.

Puštanje u rad direktnim priključenjem motora na mrežu. Priključenje asinhronog motora s kratkospojenim rotorom direktno na puni napon mreže najjednostavniji je način puštanja u rad, kako je prikazano na sl. 2.64. Zatvaranjem sklopke S proces puštanja u rad počinje. Kako u tom momentu struja puštanja može da bude 5 do 8 puta veća od nominalne struje motora, doći će do smanjenja napona u mreži uslijed porasta pada napona u vodu. Znači, ovakav način puštanja ograničen je sposobnošću mreže na koju je motor priključen, odnosno za određenu mrežu biće ograničena nominalna snaga motora koji se može puštati direktno. Sposobnost industrijskih i gradskih električnih mreža danas je takva da se direktno mogu puštati motori s kratkospojenim rotorom snage do 5 kW, a ponegdje i do 7 kW.

Kod motora većih snaga potrebno je veliku struju puštanja ograničiti na dozvoljenu vrijednost. To činimo na taj način što smanjujemo napon na krajevima njegovog statora. To smanjenje postižemo povećanjem aktivnih ili induktivnih otpora statorskog namotaja.



Sl. 2.64. Puštanje u rad asinhronog motora s kratkospojenim rotorom direktnim priključenjem na mrežu

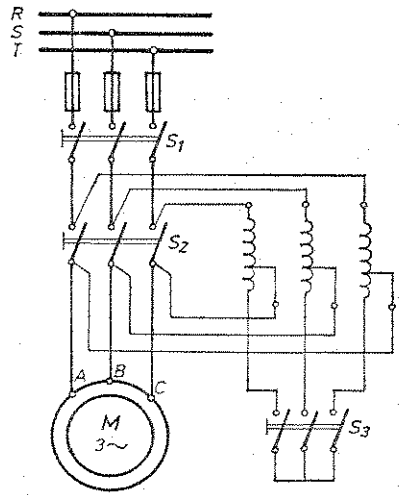


Sl. 2.65. Puštanje u rad asinhronog motora s kratkospojenim rotorom pomoću prigušnica u kolu namotaja statora

Puštanje u rad pomoću prigušnica. Motore srednjih i većih snaga puštamo u rad pomoću prigušnica, tj. dodatnog induktivnog otpora. One se priključuju u seriju sa namotajem statora, kako je to prikazano na sl. 2.65. Pri puštanju u rad najprije se zatvara sklopka S_1. Tada struja iz mreže dolazi u namotaj statora preko prigušnica koje su tako dimenzionisane da smanjuju napon na krajevima statora na 65% nominalnog napona mreže. Pri povećanju brzine vrtnje rotora (klizanje opada) dolazi do smanjenja indukovanog napona rotora, a time i struje, što izaziva smanjenje pada napona na prigušnicama, odnosno automatsko povećanje napona na krajevima statora. Kada motor dostigne određenu brzinu vrtnje, zatvaramo sklopku S_2. Na taj način smo izvršili premošćenje prigušnica. Sada je motor priključen na nominalni napon mreže.

Nedostatak ovakvog načina puštanja motora u rad je smanjeni pokretni momenat, što znatno usporava zalet motora pod teretom.

Puštanje u rad pomoću autotransformatora. Motore vrlo velikih snaga puštamo u rad pomoću autotransformatora. On se priključuje u seriju sa namotajem statora, kako je predstavljeno na sl. 2.66. Izvodi na transformatoru se podese tako da motor u momentu puštanja u rad dobije samo 50 do 75% nominalnog napona. Puštanje u rad vrši se slijedećim redoslijedom: zatvaranjem sklopke S_3 postižemo da su namotaji autotransformatora spojeni u zvijezdu. Nakon toga zatvaramo sklopku S_1, čime postižemo da namotaji statora dolaze pod sekundarni napon autotransformatora čija je vrijednost znatno smanjena. Kada se motor počinje sve brže vrtjeti, sekundarni napon postepeno raste dok se ne izjednači sa naponom mreže. Kada je zalet motora završen, otvori se sklopka S_3, a sklopku S_2 zatvorimo.

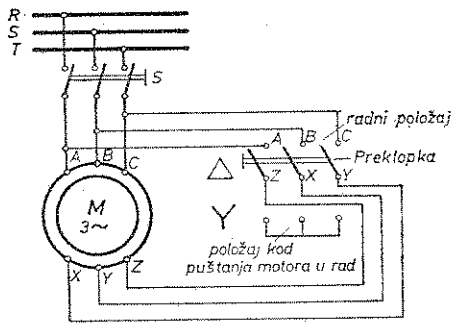


Sl. 2.66. Puštanje u rad asinhronog motora s kratkospojenim rotorom pomoću autotransformatora

Autotransformatori za puštanje razlikuju se od običnih u tome što su predviđeni za kratkotrajan rad, pa su prema tome (s obzirom na bakar i željezo) racionalno konstruisani, s velikom magnetskom indukcijom i gustinom struje u namotaju. Drugim riječima, dimenzije autotransformatora su vrlo male u odnosu na njegovu tipnu snagu.

Upoređujući puštanje u rad pomoću autotransformatora sa onim pomoću prigušnica, dolazimo do zaključka da pod istim uslovima (istim smanjenjem napona u trenutku puštanja) motor razvija veći pokretni momenat ako se puštanje vrši pomoću autotransformatora. Isto tako, struja puštanja biće znatno manja.

Puštanje u rad pomoću sklopke zvijezda — trougao. Motore s običnim kratkospojenim rotorom nominalne snage od 3 do 20 kW puštamo u rad pomoću preklopke zvijezda — trougao. Ovakav način puštanja primjenjuje se samo kod mo-



Sl. 2.67. Puštanje u rad asinhronog motora s kratkospojenim rotorom pomoću sklopke zvijezda — trougao

tora građenih za normalan rad pri spoju statorskih namotaja u trougao. Na sl. 2.67. prikazano je kako se motor preko preklopke zvijezda — trougao priključuje na mrežu.

Preklopka zvijezda — trougao izrađena je kao okretni valjak koji može zauzeti tri različita položaja. Ona se s jedne strane pomoću tri zavrtnja priključuje na mrežu, a s druge strane nosi šest zavrtanja preko kojih se sa šest provodnika spaja sa priključnom kutijom motora.

Puštanje motora u rad vrši se na ovaj način: preklopku postavimo u položaj „puštanja", u kome su namotaji statora spojeni u zvijezdu Y, a zatim zatvorimo sklopku *S*. Kada motor postigne nominalnu brzinu, preklopku dovodimo u „radni položaj", pri kome su namotaji statora spojeni u trougao Δ. Znači, za vrijeme puštanja u rad svakom faznom namotaju statora biće doveden napon za $\sqrt{3}$ puta manji od onog koji bi bio doveden pri spoju namotaja u trougao, tj. $U_Y = U_\Delta / \sqrt{3}$. Analogno tome, doći će i do istog smanjenja struje u faznom namotaju statora $I_{fY} = I_{f\Delta} / \sqrt{3}$. Pri spoju namotaja u zvijezdu, linijska struja (struja u dovodnom vodu) jednaka je struji u faznom namotaju, tj. $I_{lY} = I_{fY}$, dok je u spoju namotaja u trougao linijska struja veća za $\sqrt{3}$ puta od struje u faznom namotaju $I_{l\Delta} = \sqrt{3} I_{f\Delta}$. Dijeljenjem linijskih struja pri spoju faznih namotaja u zvijezdu i pri spoju faznih namotaja u trougao dobivamo:

$$\frac{I_{lY}}{I_{l\Delta}} = \frac{I_{fY}}{\sqrt{3}\ I_{f\Delta}} = \frac{I_{f\Delta}/\sqrt{3}}{\sqrt{3} I_{f\Delta}} = \frac{1}{3}$$

ili

$$\frac{I_{lY}}{I_{l\Delta}} = \frac{1}{3} \qquad \ldots\ldots\ (2.74)$$

Zaključujemo da je pri puštanju u rad pomoću preklopke zvijezda-trougao linijska struja puštanja pri spoju statora u zvijezdu tri puta manja nego pri spoju u trougao.

Međutim, ograničenjem struje puštanja, što predstavlja veliku prednost, u isto vrijeme zbog smanjenja faznog napona dolazi do smanjenja pokretnog momenta M_{po} za tri puta. Ne ulazeći u dokazivanje, momenat asinhronog momenta zavisi od kvadrata dovedenog faznog napona ($M = U^2$) i on je pri spoju namotaja statora u zvijezdu za $(\sqrt{3})^2 = 3$ puta manji nego pri spoju u trougao. Zato se ovakav način puštanja u rad primjenjuje samo onda kada motor u momentu pokretanja nije nominalno opterećen, npr. kada motor pokreće neku radnu mašinu ili transmisiju čiji otporni momenti u početku nisu veliki. Ovakav način puštanja u rad ne može se upotrijebiti npr. za dizalice koje u momentu uključenja zahtijevaju od motora da razvije veliki momenat.

2.6.3. Asinhroni motori s kratkospojenim rotorom specijalne izvedbe sa poboljšanim karakteristikama pri puštanju u rad

Da bi se dobile bolje karakteristike pri puštanju u rad (veći pokretni momenat i ograničena struja puštanja), a sačuvala jednostavnost motora i njegova sigurnost u radu, prišlo se izvedbi specijalne konstrukcije rotora motora. Najširu primjenu postigli su:

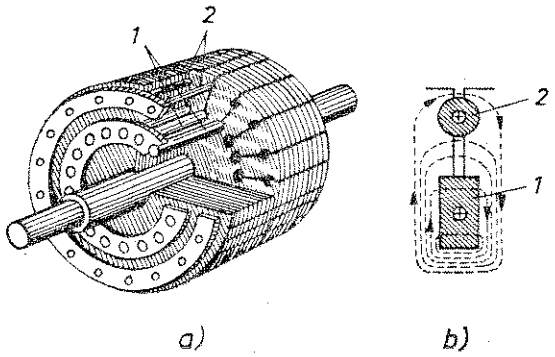
— *motori s dvostrukim kavezom odnosno dvostrukim utorima i*

— *motori s dubokim i uskim utorima.*

Ovakvom specijalnom konstruktivnom izvedbom rotora struja puštanja je samo 3 do 5 puta veća od nominalne u odnosu na motor s običnim kratkospojenim rotorom (struja puštanja 5—8 puta veća od nominalne).

Asinhroni motori s dvostrukim kavezom. Rotor motora s dvostrukim kavezom sastoji se od dva odvojena namotaja (kaveza) uložena u utore, kako je prikazano na sl. 2.68. Oni imaju različite funkcije. Naime, vanjski kavez 2 s velikim aktivnim, a malim induktivnim otporom (štapovi kaveza malog poprečnog presjeka) ima ulogu kaveza za puštanje. Unutrašnji kavez 1 izveden je s štapovima većeg poprečnog presjeka i zbog toga ima mali aktivni, a relativno velik induktivni otpor. Ovaj kavez vrši ulogu osnovnog radnog kaveza motora.

Različitost parametara oba namotaja (kaveza) rotora postiže se time što se kavez za puštanje izrađuje od materijala s visokim specifičnim otporom, npr. mesinga, i stavlja se bliže površini rotora, dok se radni kavez izrađuje od materijala dobre specifične provodnosti, npr. bakra, i postavljen je dalje od površine rotora.



Sl. 2.68. Rotor s dvostrukim kavezom: a) presjek rotora, b) presjek utora 1 — unutrašnji kavez; 2 — vanjski kavez.

Posmatrajući sl. 2.68b, na kojoj je prikazan presjek utora rotora, vidimo da je gornji štap 2 obuhvaćen malim brojem silnica rasipnog magnetskog toka u odnosu na donji štap 1 koji je obuhvaćen velikim rasipnim tokom. Tako je postignuto da upravo gornji štap, tj. namotaj za puštanje ima mali induktivni otpor, dok donji štap (radni namotaj) ima relativno veliki induktivni otpor. Pošto je struja naizmje-

nična, i rasipni tok je naizmjenično promjenljiv. Promjenljivi magnetski tok u oba štapa indukuje napone.

U početku puštanja u rad frekvencija struje rotora jednaka je frekvenciji mreže, tj. $f_2=f_1$. Indukovani naponi u štapovima stvoreni rasipnim magnetskim tokom po Lencovom zakonu imaće takav smjer da će se protiviti struji koja teče štapovima. Pošto je indukovani napon rasipanja mnogo veći u štapu 1 nego u štapu 2, to će i indukovani otpor štapa 1 biti znatno više povećan nego štapa 2. Pošto su kavezi spojeni paralelno, raspodjela struje rotora među njima biće obrnuto srazmjerna njihovim prividnim otporima (impedancama). Dakle:

$$\frac{I_{2p}}{I_{2r}}=\frac{Z_{2r}}{Z_{2p}}=\frac{\sqrt{R_{2r}^2+X_{2r}^2}}{\sqrt{R_{2p}^2+X_{2p}^2}} \quad \ldots\ldots (2.75)$$

U početnom momentu puštanja u rad vrijednost induktivnih otpora namotaja (kaveza) je mnogo veća od vrijednosti aktivnih otpora, te imamo:

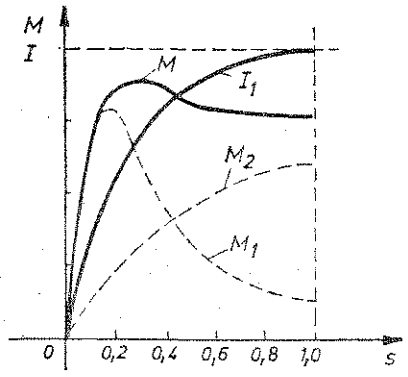
$$\frac{I_{2p}}{I_{2r}}\approx\frac{X_{2r}}{X_{2p}} \quad \ldots\ldots (2.76)$$

Kako smo već utvrdili da je induktivni otpor kaveza pokretanja X_{2p} mnogo manji od induktivnog otpora radnog kaveza X_{2r}, nije teško zaključiti da će gotovo sva struja rotora teći kroz vanjski kavez 2, tj. kavez za puštanje. Pošto smo već ustanovili da ovaj kavez ima povećan aktivni otpor, on će pri puštanju u rad stvoriti velik pokretni momenat.

Povećanjem brzine rotora klizanje s opada, pa i frekvencija struje u njemu ($f_2=s f_1$), usljed čega se smanjuju induktivni otpori u oba namotaja (kaveza). To uzrokuje promjenu raspodjele struje rotora između kaveza, tj. dolazi do postepenog potiskivanja struje iz kaveza za pokretanje u radni kavez.

Onog momenta kada motor postigne nominalnu brzinu vrtnje (frekvencija rotora f_2 ima vrlo malu vrijednost), induktivni otpori namotaja su vrlo mali i njihov uticaj na raspodjelu struje rotora možemo zanemariti. U tom slučaju struja rotora se raspodjeljuje obrnuto proporcionalno aktivnim otporima kaveza, tj.:

$$\frac{I_{2p}}{I_{2r}}\approx\frac{R_{2r}}{R_{2p}} \quad \ldots\ldots (2.77)$$



Sl. 2.69. Zavisnost struje I_1, ukupnog obrtnog momenta M, momenata vanjskog i unutrašnjeg kaveza M_2 i M_1 od klizanja motora s

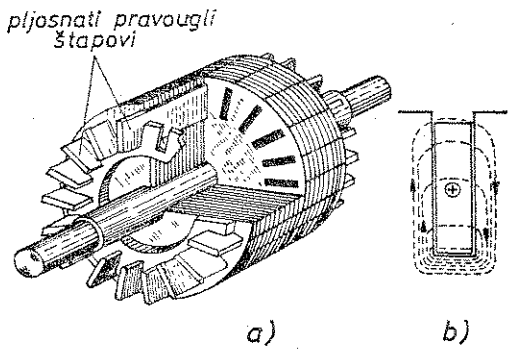
Pošto je vrijednost aktivnog otpora radnog kaveza R_{2r} mnogo manja od vrijednosti aktivnog otpora kaveza za pokretanje R_{2p}, gotovo sva struja rotora teći će radnim kavezom.

Da zaključimo: kod motora s dvostrukim kavezom struja rotora u početnom momentu puštanja u rad biva potisnuta u kavez za pokretanje, u kome se stvara veći pokretni momenat, a kada se puštanje u rad završi, struja teče kroz radni kavez čiji je aktivni otpor mali, pa motor radi s velikim stepenom korisnog djelovanja. Na sl. 2.69. prikazane su tipične krivulje zavisnosti ukupnog obrtnog momenta M, momenata vanjskog i unutrašnjeg kaveza M_2 i M_1 i struje I_1 od klizanja motora s.

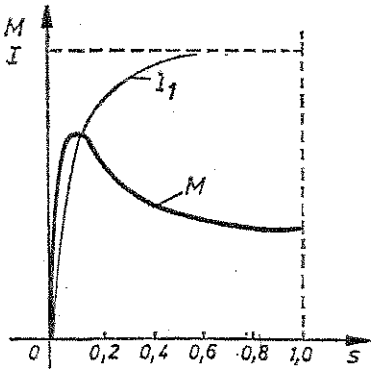
Motori s dvostrukim kavezom primjenjuju se uglavnom onda kada postoje veći zahtjevi s obzirom na karakteristike pokretanja, npr. pri okretanju mehanizama s velikim statičkim i dinamičkim momentima otpora (drobilice, klipni kompresori, centrifuge, mlinovi i sl.). Grade se u širokom rasponu snage od 5 kW do 20 MW. Skuplji su za 20 do 30% od kaveznih motora normalne izvedbe.

Asinhroni motori s dubokim utorima. U posljednje vrijeme sve širu primjenu imaju motori s dubokim utorima. Kod njih se namotaj (kavez) rotora izrađuje od uskih štapova koji se smještaju u duboke utore čija je visina i do desetak puta veća od širine. Štapovi se prave od bakra ili aluminijuma. Motor ovakve izvedbe znatno je jednostavnije izvedbe i jeftiniji od motora s dvostrukim kavezom, jer mu za izradu štapova nije potreban materijal s velikim specifičnim otporom.

Uloga dubokih utora slična je kao i kod dvostrukog kaveza, poboljšava karakteristike puštanja koristeći se kao i do sada pojavom potiskivanja struje. Naime, pljosnati pravougli štap koji je smješten u duboki utor istog oblika (sl. 2.70) obuhvaćen je rasipnim magnetskim tokom čiji se centar spustio do osnovice utora. Donji slojevi štapa, kako se sa slike vidi, obuhvaćeni su mnogo većim rasipnim magnetskim tokom od gornjih slojeva, pa zbog toga im je i induktivni otpor veći.



Sl. 2.70. Rotor s dubokim utorom: a) presjek rotora, b) presjek utora.



Sl. 2.71. Zavisnost struje I_1 i obrtnog momenta M od klizanja s motora s dubokim utorom

U početnom momentu puštanja u rad frekvencija struje rotora jednaka je frekvenciji mreže $f_2=f_1$. Raspodjela struje po zamišljenim slojevima štapa određena je na osnovu vrijednosti njihovih induktivnih otpora. Usljed toga doći će do potiskivanja struje rotora u gornji sloj štapa. Pošto je poprečni presjek gornjeg sloja štapa kroz koji potisnuta struja teče mnogo manji od poprečnog presjeka cijelog štapa, doći će do prividnog povećanja aktivnog otpora namotaja rotora. To će izazavati povećanje pokretnog momenta, a smanjenje struje puštanja.

Povećanjem brzine rotora, klizanje s opada, pa i frekvencija struje u njemu ($f_2 = s f_1$), usljed čega se smanjuje induktivni otpor namotaja. To uzrokuje ravnomjerniju raspodjelu struje u rotoru, a time i smanjenja aktivnog otpora namotaja rotora. Onog momenta kada motor postigne nominalnu brzinu vrtnje (frekvencija rotora f_2 ima vrlo malu vrijednost), potiskivanje struje praktično prestaje i motor poprima svojstva običnog motora s kratkospojenim rotorom.

Na sl. 2.71. prikazane su tipične krivulje zavisnosti obrtnog momenta M i struje I_1 od klizanja motora s.

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta znači pustiti asinhroni motor u rad i kada je taj proces uspješno završen?
2. Kakvu vrijednost treba da imaju pokretni momenat i struja puštanja u momentu puštanja motora u rad?
3. Kako puštamo u rad asinhrone motore s kliznim prstenovima?
4. Kako puštamo u rad asinhrone motore s kratkospojenim rotorom?
5. Kakvu ulogu ima rotor s dvostrukim kavezom?
6. Kakvu ulogu ima rotor s dubokim utorima?

2.7. REGULACIJA ILI PROMJENA BRZINE OKRETANJA ASINHRONIH MOTORA

Brzina okretanja opterećenog asinhronog motora mijenja svoju vrijednost neznatno. Od praznog hoda do nominalnog opterećenja ta promjena kod motora većih snaga iznosi oko 4% nominalnog broja okretaja, dok kod motora manjih snaga ide i do 10%.

Međutim, kod mnogih motora u pogonu neophodna je regulacija broja okretaja u širim granicama, nezavisno od opterećenja motora. Da bi se to postiglo, potrebne su dodatne naprave za mijenjanje veličina od kojih zavisi brzina okretanja.

Iz već poznate jednačine (2.27).

$$n = n_1 (1 - s)$$

vidimo da brzina okretanja trofaznog asinhronog motora zavisi od klizanja s i od brzine okretanja obrtnog magnetskog polja, tj. sinhrone brzine n_1. Mijenjajući na bilo koji način ove dvije veličine, možemo regulisati brzinu okretanja motora.

Regulaciju klizanja asinhronog motora možemo izvršiti na dva načina:

— promjenom napona, što ga dovodimo na stator, i

— promjenom otpora u kolu namotaja statora i rotora.

S druge strane, iz također poznate jednačine (2.21) za brzinu okretanja obrtnog magnetskog polja

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

vidimo da njegovu regulaciju, a time i regulaciju brzine okretanja rotora možemo izvršiti na dva načina:

— promjenom frekvencije mreže i

— promjenom broja pari polova.

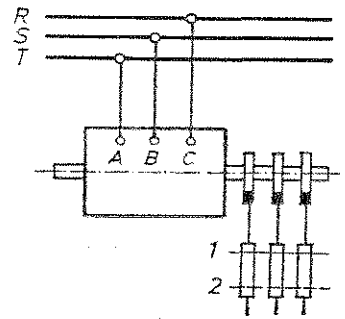
Osim navedena četiri načina, regulisanje brzine okretanja može se izvesti i pomoću tzv. kaskadnih spojeva asinhronih motora s drugim električnim mašinama. Isto tako, brzina se može regulisati pomoću dvojnih asinhronih motora, čije se brzine osovina sabiraju ili oduzimaju mehaničkim putem.

2.7.1. Regulacija brzine okretanja promjenom napona mreže

Promjenom dovedenog napona na statoru može se promijeniti i broj okretaja motora. Naime, smanjenjem napona dolazi do povećanja klizanja, odnosno do smanjenja broja okretaja motora. Nedostatak ovakve regulacije broja okretaja je u tome što se promjenom napona mijenja i obrtni momenat motora. Kako znamo, on se smanjuje s kvadratom napona, pa je zbog toga ovakav način regulacije ograničen, jer pokretni momenat ne smije pasti ispod momenta tereta.

2.7.2. Regulacija brzine okretanja promjenom aktivnog otpora u kolu namotaja rotora

Regulacija brzine okretanja uključivanjem aktivnih otpora u kolo namotaja rotora može se primijeniti samo kod asinhronih motora s kliznim prstenovima. U kolo namotaja rotora stavlja se regulacioni otpornik, kako je prikazano na sl. 2.72. On mora biti tako proračunat, odnosno dimenzionisan da se ne pregrijava kad kroz njega teče duže vremena radna struja rotora. Stoga se napuštači, odnosno otpornici za puštanje motora u rad ne mogu upotrijebiti kao regulatori brzine okretanja, jer su proračunati za kratkotrajan prolaz struje tokom puštanja.



Sl. 2.72. Regulacija brzine okretanja promjenljivim otpornikom u kolu namotaja rotora

Odranije nam je poznato (vidi čl. 2.2.4) da ubacivanjem dodatnog aktivnog otpora u kolo namotaja rotora vrijednost prekretnog momenta ostaje stalna, dok se mijenja klizanje koje mu odgovara i oblik radne karakteristike motora (vidi sl. 2.43). To znači, na ovoj način dolazi do smanjenja broja okretaja.

Prema tome, pri razmatranju procesa regulacije brzine okretanja smatraćemo da je

pored stalnog statičkog momenta stalan i napon U_1 kao i frekvencija f_1. Stalni momenat, koji praktično ne ovisi o brzini, postoji npr. kod dizala koja podižu teret određene mase ili na stroju koji skida strugotinu određene debljine.

Kako ćemo izračunati vrijednost dodatnog otpora R_d koji je potreban za regulisanje brzine okretanja? Vrlo jednostavno. Naime, pri stalnoj vrijednosti momenta tereta M_t, bez spojenog dodatnog otpora u kolu namotaja rotora ($R_d=0$) klizanje iznosi s. Ako želimo da postignemo drugo klizanje npr. s', moramo dodatni otpor R_d uključiti u kolo namotaja rotora pa je:

$$\frac{R_2+R_d}{R_2}=\frac{s'}{s},$$

odakle dobijemo:

$$R_d=R_2\left(\frac{s'}{s}-1\right) \qquad \ldots\ldots (2.78)$$

Ovakav način regulisanja brzine okretanja omogućava ravnomjerno (kontinuirano) podešavanje brzine u širokim granicama.

Loše strane ovakvog načina regulisanja brzine su u tome što se u dodatnom otporu stvaraju veliki gubici snage saglasno formuli (2.41) koja pokazuje da su gubici snage u bakru rotora srazmjerni klizanju $P_{2Cu}=q_2R_2I_2^2=s\,P_{em}$. To pokazuje da porastom klizanja (brzina okretanja opada) rastu i gubici snage u bakru rotora, što uzrokuje smanjenje stepena korisnog djelovanja motora.

Pri smanjenju brzine pogoršavaju se uslovi ventilacije, jer se smanjuje količina hladnog vazduha koja dolazi u motor. Na taj način uslovi hlađenja postaju otežani.

U praksi ovaj način regulisanja brzine okretanja primjenjuje se uglavnom kod motora manjih snaga, npr. u dizalima.

Još da kažemo da je regulisanje brzine okretanja na ovaj način najekonomičnije ako se brzina smanji do 20% i ako to podešavanje brzine traje kratko vrijeme.

2.7.3. **Regulacija brzine okretanja promjenom frekvencije mreže**

Promjenom frekvencije struje u kolu namotaja statora mijenja se sinhrona brzina okretanja, a time i brzina okretanja rotora, kako se vidi iz jednačine

$$n=n_1\,(1-s)=\frac{60\,f_1}{p}\,(1-s) \qquad \ldots\ldots (2.79)$$

To znači, poveća li se frekvencija f_1, povećaće se i broj okretaja rotora n, i obratno. Međutim, promjenom frekvencije mreže doći će i do promjene obrtnog magnetskog toka Φ. Tu promjenu obrtnog magnetskog toka ne smijemo dozvoliti, jer se s njom mijenjaju radne karakteristike motora.

Zanemarujući male padove napona u kolu namotaja statora, obrtni magnetski tok zadržaće približno stalnu vrijednost ako se istovremeno s promjenom frekvencije f_1 mijenja i napon U, kako se ne bi izmijenilo magnetsko zasićenje motora. To dokazujemo već poznatim izrazom (2.52) za indukovani napon. Dakle:

$$U\approx E_1=4{,}44\,f_1N_1k_{n1}\Phi.$$

Povezujući stalne veličine u novu konstantu $4{,}44\,N_1k_{n1}=k$, dobivamo:

$U=k\,f_1\,\Phi$, odnosno

$$\frac{U_k}{f_1}=k\Phi=\text{const.} \qquad \ldots\ldots (2.80)$$

Iz izvedenog obrasca izlazi da je za održavanje stalnog magnetskog toka potrebno istovremeno mijenjati napon mreže U srazmjerno sa njegovom frekvencijom.

Kod nas frekvencija mreže na koju se priključuje motor iznosi 50 Hz. Iz tog izlazi da je, ukoliko želimo vršiti regulaciju brzine okretanja promjenom frekvencije, potrebno imati izvor koji daje struju čija se frekvencija može mijenjati. To je elektromašinski pretvarač frekvencije koji se spaja u priključni vod za motor. On može frekvenciju mijenjati bez skokova, kontinuirano u širokom opsegu, što je značajno da se regulisani broj okretaja na takav način mijenja. U priključni vod uključujemo i napravu za kontinuiranu regulaciju napona.

Istovremeno podešavanje amplitude napona i njegove fekvencije postiže se statičkim tiristorskim pretvaračima. Iako su oni prilično skupi, zbog svojih dobrih tehničkih i ekonomskih pokazatelja u posljednje vrijeme sve se više primjenjuju za ovakav način regulisanja brzine okretanja asinhronih motora.

2.7.4. **Regulacija brzine okretanja promjenom broja pari polova**

Mijenjajući broj pari polova namotaja statora p, mijenja se brzina obrtnog magnetskog polja motora, pa prema tome i brzina okretanja rotora. Pošto broj pari polova može biti samo cijeli broj, to je regulacija brzine okretanja rotora stepenasta.

Promjenu broja pari polova postižemo na dva načina:

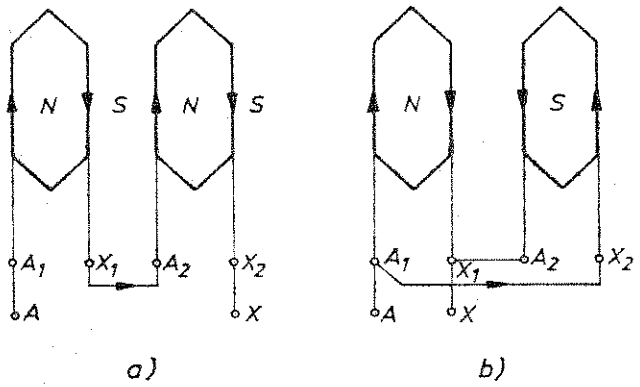
— smještanjem u utore statora dva odvojena namotaja, svakog sa različitim brojem pari polova i

— smještanjem u utore statora samo jednog namotaja, čijim unutrašnjim prespajanjem u drukčiji redoslijed svitaka dobivamo različit broj pari polova.

Ovakvi motori, koje nazivamo *višebrzinski*, izvode se s kratkospojenim rotorom, koji imaju to svojstvo da se lako prilagođavaju svakom broju pari polova namotaja statora. Mogu imati dvije, tri ili četiri brzine okretanja.

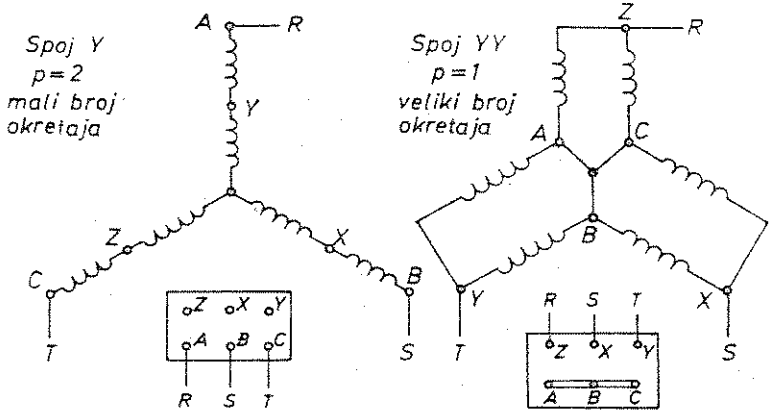
Zbog jednostavnosti, ekonomičnosti i boljeg stepena korisnog djelovanja, više se izvode višebrzinski asinhroni motori s jednim namotajem u statoru, čijim se prespajanjem ostvaruje promjena broja pari polova sa odnosom 1:2, odnosno ograničava brzina na odnos 2:1. Izvedbu namotaja sa mogućnošću prespajanja patentirali su 1897. godine Dalander i Lindstrem, pa se takvi namotaji nazivaju Dalanderovi namotaji. Na sl. 2.73. prikazana je shema jednog faznog namotaja statora. Svaki svitak predstavlja jedan dio (jednu grupu) faznog namotaja čiji su krajevi označeni sa A_1-X_1 i A_2-X_2. Spojimo li grupe faznog namotaja u seriju (sl. 2.73a), dobićemo namotaj s dva para polova, odnosno brzinu okretanja obrtnog magnetskog polja (1 500 °/min). Povezivanjem grupa faznih namotaja paralelno (sl. 2.73b), mijenja se smjer struje u drugoj grupi faznog namotaja. To uzrokuje

smanjenje broja pari polova za dva puta. Znači, u našem primjeru namotaj obrazuje jedan par polova ($p=1$), što odgovara dva puta većoj sinhronoj brzini okretanja $n=3\,000\,^{o}/\text{min}$.



Sl. 2.73. Shema prespajanja jednog faznog namotaja statora a) sa $p=2$ para polova, b) na $p=1$ par polova

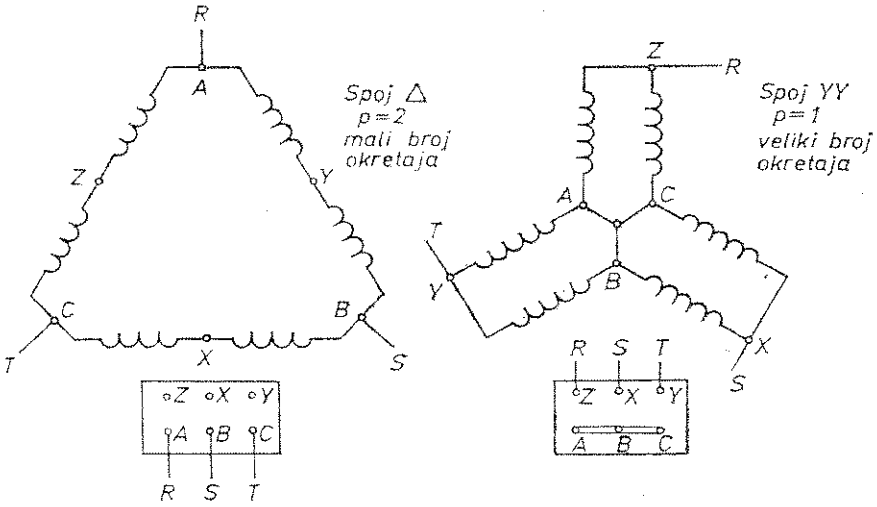
Na sl. 2.74. i 2.75. prikazane su sheme prespajanja namotaja statora koje se najčešće upotrebljavaju da bi se dobio odnos broja pari polova 1:2. Svaki fazni namotaj izveden je tako da ima tri izvoda: početak, sredinu i završetak. Prespajanje se izvodi tako da se kod većeg broja pari polova dijelovi faznog namotaja spajaju u zvijezdu, a namotaj u trougao, dok se kod manjeg broja pari polova dijelovi faznog namotaja spajaju paraleno, a namotaj u zvijezdu. Promjena smjera struje u jednoj polovini svakog faznog namotaja postiže se prenosom dovoda struje sa početka u sredinu faznog namotaja pomoću specijalne preklopke.



Sl. 2.74. Shema prespajanja namotaja Y/YY za pogon ventilatora

Na sl. 2.74. prikazana shema prespajanja namotaja statora Y/YY pomoću koje obezbjedujemo da motor pređe s jedne brzine okretanja na drugu, a da pritom obrtni momenat ostaje nepromijenjen npr. kod pumpi, centrifugalnih kompresora i ventilatora. Dalanderovim spojem Δ/YY (sl. 2.75) postižu se približno jednake snage pri obje brzine okretanja.

Prilikom puštanja u rad višebrzinskih motora, bez obzira da li je motor izveden s odvojenim namotajima ili s Dalanderovim namotajem, pokretanje uvijek



Sl. 2.75. Shema prespajanja namotaja Δ/YY

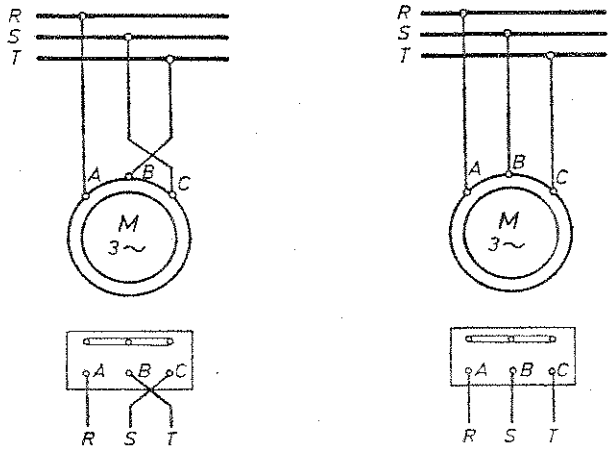
počinje namotajem manje brzine, odnosno većim brojem pari polova, pa se tokom zaleta vrši prespajanje na veću brzinu. Ako je spoj za manju brzinu Δ, tada se za puštanje u rad može primjenjivati sklopka Y/Δ.

Pored relativne konstruktivne složenosti (veće dimenzije i masa, veća cijena koštanja), danas dvobrzinski motori imaju široku primjenu.

2.7.5. **Promjena smjera okretanja asinhronog motora**

Odranije znamo da je smjer okretanja asinhronih motora određen smjerom vrtnje obrtnog magnetskog polja. Naime, u kom smjeru se okreće obrtno magnetsko polje u motoru u tom smjeru će se okretati rotor motora. Iz tog izlazi da mijenjanjem smjera okretanja obrtnog magnetskog polja dolazi do promjene smjera okretanja rotora motora. Kako to postižemo? Na vrlo jednostavan način: zamjenom priključnih mjesta bilo koja dva fazna provodnika koji u motor dovode struju, kako je npr. prikazano na sl. 2.76. Kod asinhronih motora koji za vrijeme normalnog rada moraju

mijenjati smjer okretanja, mijenjanje se izvodi pomoću za to predvidenih preklopki. Upravljanje preklopkom može se vršiti ručno ili kod motora većih snaga pomoću automata. Isto tako, postoje i sklopke zvijezda — trougao izvedene za oba smjera kretanja.



Sl. 2.76. Promjena smjera okretanja asinhronog motora zamjenom mjesta dvaju priključnih provodnika u priključnoj kutiji

PITANJA ZA PROVJERU

1. Od čega zavisi brzina okretanja asinhronog motora?
2. Koji su to načini pomoću kojih možemo mijenjati brzinu okretanja asinhronog motora?
3. Da li možemo napuštač upotrijebiti za regulaciju brzine okretanja asinhronog motora?
4. Objasni kako vršimo regulaciju brzine okretanja promjenom frekvencije mreže!
5. Objasni regulaciju brzine okretanja promjenom broja pari polova statora!
6. Kako možemo promijeniti smjer okretanja asinhronog motora?

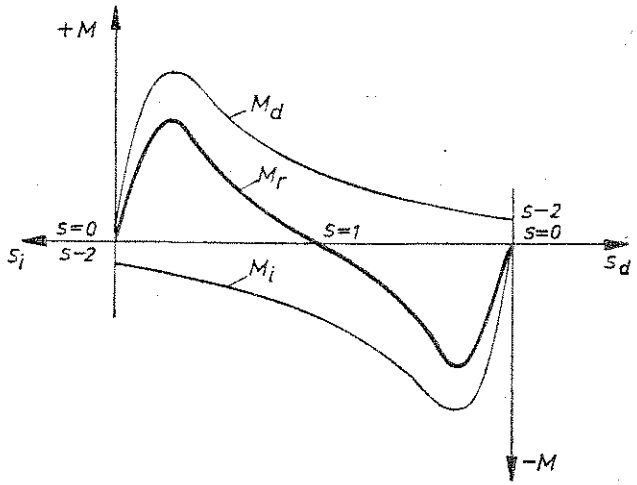
2.8. JEDNOFAZNI ASINHRONI MOTOR

Pored trofaznih asinhronih motora, o kojima je do sada bilo govora, vrlo široku primjenu imaju jednofazni asinhroni motori. Upotrebljavaju se tamo gdje nema izgrađene trofazne mreže, npr. u seoskim domaćinstvima, u udaljenim poljoprivrednim pogonima i sl. Međutim, i tamo gdje imamo izrađenu trofaznu mrežu

iz ekonomskih razloga se mala trošila priključuju jednofazno (jednofazni priključak je jeftiniji od trofaznog). Obično se izvode za pokretanje uređaja i mašina manjih snaga (do 0,5 kW) u zanatstvu, a posebno u domaćinstvima. Također se primjenjuju u industriji za pogon uređaja većih snaga.

2.8.1. Način rada jednofaznog asinhronog motora

U utorima statora jednofaznog asinhronog motora smješten je jedan fazni namotaj. On zauzima 2/3 utora. Kada kroz njega teče jednofazna naizmjenična struja, ona stvara nepokretni pulzirajući magnetni tok. S ciljem ispitivanja rada jednofaznog motora, ovaj magnetski tok možemo rastaviti na dva jednaka obrtna toka, koja se okreću sinhrono u suprotnim smjerovima.



Sl. 2.77. Zavisnost obrtnih momenata od klizanja u jednofaznom asinhronom motoru

Kada rotor motora miruje, direktni (Φ_d) i inverzni (Φ_i) sinhroni magnetski tok, djelujući svaki zajedno sa strujom rotora, stvaraju dva jednaka i suprotno rotirajuća momenta koji se međusobno uravnotežuju. Zato je početni pokretni momenat jednofaznog motora jednak nuli. Na sl. 2.77. prikazane su krivulje direktnog momenta M_d i inverznog M_i stvorenih od direktnog i inverznog magnetskog toka. Pošto je momenat inverznog magnetskog toka suprotnog smjera i pošto klizanju rotora s prema direktnom magnetskom toku odgovara klizanje $2\text{-}s$ prema inverznom, krivulja inverznog momenta nacrtana je ispod apscisne ose i okrenuta tako da joj početak O dolazi u tačku koja odgovara klizanju 2 na krivulji direktnog momenta. Algebarskim sabiranjem ova dva momenta dobivamo rezultantni momenat jednofaznog motora predstavljen krivuljom M_r. On je manji od momenta koji bi stvorio jedan od dva obrtna magnetska toka na koje se razlaže nepokretni pulzirajući magnetski tok statora. Sa slike se jasno vidi da je pri klizanju $s=1$, tj. kad rotor miruje,

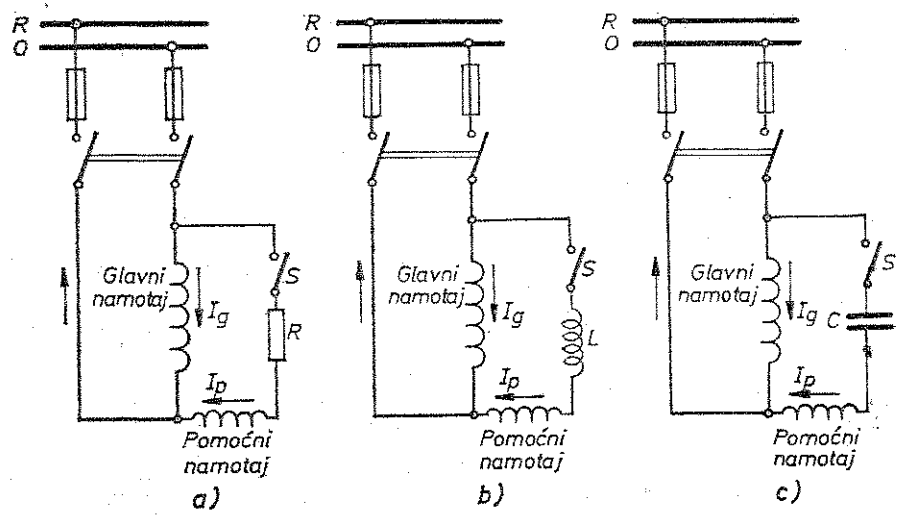
momenti direktnog i inverznog magnetskog toka su jednaki ali suprotni. Iz toga izlazi da je pokretni momenat jednofaznog motora ravan nuli i zato se motor neće moći samostalno pokrenuti.

Da bi se motor mogao pokrenuti, potrebno je da jedan od momenata bude potpomognut, tj. da bude veći od drugog. To ćemo postići na taj način što ćemo rukom ili oprugom pokrenuti rotor u bilo kom smjeru. Nastavljajući dalje rotiranje dolazi do savladavanja onog suprotnog momenta. Ovakav način pokretanja motora u savremenim elektromotornim pogonima nije praktičan i zato se pristupilo iznalaženju drugih rješenja.

2.8.2. **Puštanje u rad jednofaznog asinhronog motora**

S obzirom na to da u stanju mirovanja ($s=1$) jednofazni asinhroni motor ima samo nepokretni pulzirajući magnetski tok i pošto mu je pokretni momenat jednak nuli, za puštanje u rad i stvaranje početnog pokretnog momenta upotrebljavaju se posebne naprave.

Zbog toga se u utore statora pored *radnog (glavnog) namotaja* smješta još i *namotaj za pokretanje*, tzv. *pomoćni namotaj (pomoćna faza)*. Pomoćni namotaj smješten je u nepopunjenu trećinu utora, tako da je njegova osa prostorno pomaknuta od ose glavnog namotaja za 90 električnih stepeni. Tako je ispunjen prvi uslov za stvaranje obrtnog magnetskog polja. Drugi uslov je da i struja koja protiče pomoćnim namotajem bude vremenski pomaknuta prema struji koja teče u glavnom namotaju. To postižemo na taj način što između mreže i pomoćnog namotaja stavljamo dodatni otpor. On može biti aktivni (omski), induktivni i kapacitivni, kako je prikazano na sl. 2.78.

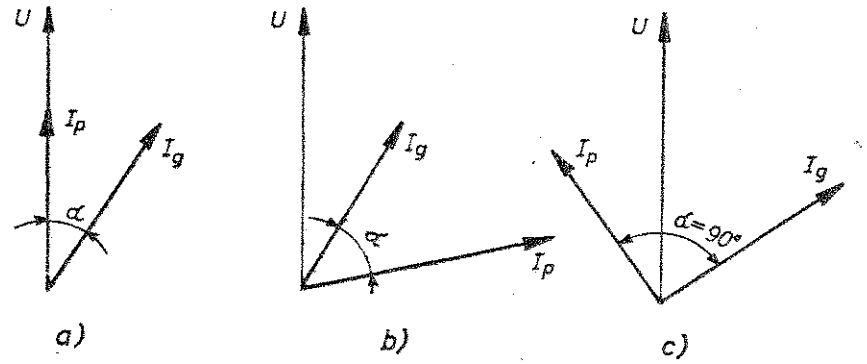


Sl. 2.78. Sheme jednofaznog asinhronog motora sa pomoćnim namotajem i dodatnim otporom za puštanje u rad

Prema tome, prilikom puštanja u rad nećemo imati jednofazni motor, nego dvofazni, koji će stvoriti obrtno magnetsko polje, pod čijim uticajem rotor počinje da se okreće. Obrtno polje je obično eliptično, a ne kružno. Kada motor dostigne $75 \div 80\%$ nominalne brzine okretanja, pomoćni namotaj se isključuje, a motor i dalje radi sa jednim (glavnim) namotajem. Pomoćni namotaj se isključuje pomoću centrifugalne sklopke, strujnog ili vremenskog releja.

Kakav će biti pokretni momenat jednofaznog asinhronog motora zavisi od toga koji ćemo način puštanja u rad upotrijebiti.

Ako u kolo pomoćnog namotaja stavimo aktivni otpor R (sl. 2.78a), struja u pomoćnom namotaju I_p biće u fazi s naponom U, dok će struja glavnog namotaja I_g zaostajati za neki ugao α koji je manji od 90°, jer glavni namotaj pored aktivnog ima i induktivni otpor, kako je prikazano na sl. 2.79a. Pri ovakvom načinu puštanja



Sl. 2.79. Vektorski dijagram struja pri puštanju u rad jednofaznih asinhronih motora: a) sa aktivnim otporom u kolu pomoćnog namotaja, b) sa induktivnim otporom u kolu pomoćnog namotaja c) sa kapacitivnim otporom u kolu pomoćnog namotaja.

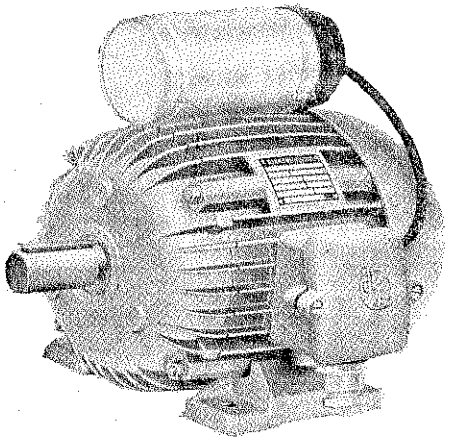
u rad pokretni momenat veći je do 50% od nominalnog. Zato se ovakav način puštanja u rad primjenjuje za one mašine i uređaje kojima nije potreban veliki pokretni momenat. To su razne vrste mašina u domaćinstvu (frižideri, mikseri i sl.), kancelarijske mašine, medicinski aparati itd.

Neki jednofazni asinhroni motori izvode se bez dodatnog aktivnog otpora R u kolu pomoćnog namotaja. Međutim, povećanje aktivnog otpora u pomoćnom namotaju moramo postići. To činimo tako što se on izvodi od provodnika čiji je presjek manji od presjeka provodnika glavnog namotaja. To će izazvati veće strujno opterećenje, koje neće štetiti, jer je namotaj uključen vrlo kratko vrijeme pokretanja. Osim toga, dio pomoćnog namotaja namotava se bifilarno, pa se na taj način smanjuje njegov induktivni otpor.

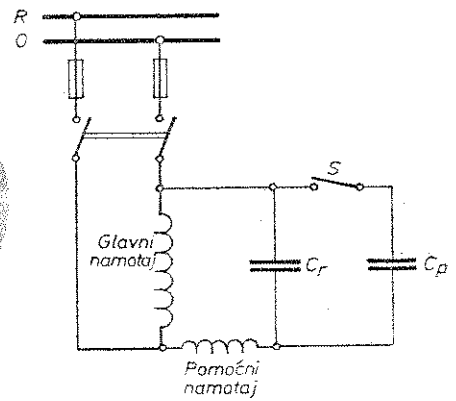
Uključenjem induktivnog otpora u kolo pomoćnog namotaja (sl. 2.78b) fazni pomak između struje I_p i napona U se povećava. U ovom slučaju struja pomoćnog namotaja I_p zaostaje za strujom glavnog namotaja I_g za ugao manji od 90° (sl. 2.79b), pa će rotor da se okreće u suprotnom smjeru od onog u prethodnom slučaju. Zbog slabih rezultata ovakav način puštanja u rad danas se rijetko primjenjuje.

Tokom puštanja u rad jednofaznih asinhronih motora obrtni magnetski tok ćemo ostvariti samo onda ako u kolo pomoćnog namotaja uključimo kapacitivni otpor (sl. 2.78c). Može se postići da fazni pomak između struja glavnog i pomoćnog namotaja pri pogodnom izboru kapaciteta kondenzatora bude 90° (sl. 2.79c). Ukoliko pri tome oba namotaja stvaraju iste magnetne napone, u momentu puštanja motora u rad u njemu će se obrazovati kružni obrtni magnetski tok i motor će stvoriti vrlo veliki pokretni momenat. On čak može iznositi i do 250% nominalnog momenta. Zato se ovaj način puštanja u rad najčešće primjenjuje, a naročito kod mašina i naprava koje zahtijevaju veliki okretni momenat. To su teške poljoprivredne mašine, kompresori, uređaji za klimatizaciju, mašine za pranje veša itd.

Jednofazni asinhroni motori, u kojih pomoćni namotaj i kondenzator ostaju uključeni za sve vrijeme rada, nazivaju se *kondenzatorski motori*. To su, u stvari, motori s dva namotaja koji su preko kondenzatora priključeni na jednofaznu mrežu. Kod ovih motora i glavni i pomoćni namotaj ispunjavaju isti broj utora i posjeduju istu snagu. Kondenzator koji s pomoćnim namotajem ostaje uključen za sve vrijeme rada motora naziva se *radni* ili *pogonski kondenzator*. Na sl. 2.80. prikazan je jednofazni asinhroni motor s trajno priključenim, tzv. pogonskim kondenzatorom. Njihov stepen korisnog djelovanja ide i do 70% i znatno je veći nego kod jednofaznih motora s pomoćnim namotajem. Faktor snage je 0,92 i veći je nego kod trofaznih motora iste snage.



Sl. 2.80. Jednofazni asinhroni motor s trajno priključenim radnim ili pogonskim kondenzatorom



Sl. 2.81. Shema jednofaznog kondenzatorskog motora sa radnim kondenzatorom C_r i kondenzatorom za puštanje u rad C_p

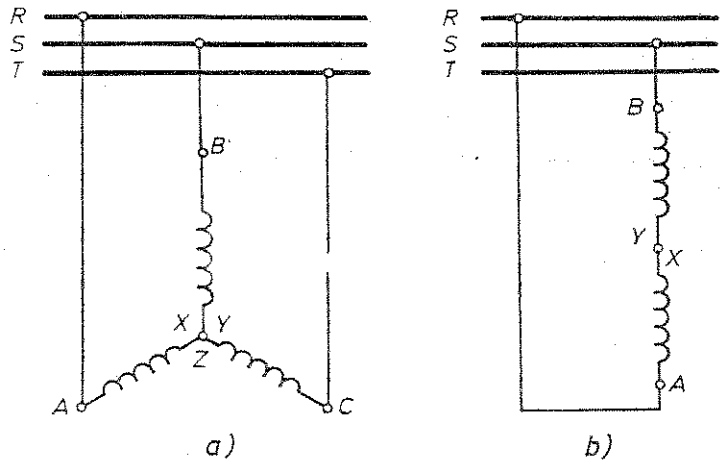
Pokretni momenat kondenzatorskih motora srazmjerno je mali i iznosi do 60% nominalnog momenta. Međutim, prekretni momenat iznosi čak 200% nominalnog momenta. Zbog ovih osobina, tj. malog pokretnog momenta i velike sposobnosti da podnese kratkotrajna preopterećenja, ovi motori vrlo su prikladni za pogon mašina i naprava kao npr. ventilatora, brusnih i polirnih mašina, raznih vrsta mješalica, cirkulara, preša, mlinova itd. kod kojih se zalet vrši bez tereta.

Polazni momenat možemo znatno povećati ako u toku puštanja u rad kondenzatorskih motora paralelno sa radnim kondenzatorom C vežemo još jedan kondenzator koji isključivo služi za puštanje u rad, kako je prikazano na sl. 2.81. Kada motor dostigne brzinu blizu nominalne, kondenzator C_p se isključuje.

Kapacitet kondenzatora koji služi za puštanje u rad mnogo je veći od kapaciteta radnog kondenzatora.

2.8.3. **Rad trofaznog asinhronog motora kao jednofaznog**

Ako se trofaznom asinhronom motoru koji radi u pogonu namjerno isključi jedan fazni namotaj ili u njemu usljed neke greške nastane prekid, motor će nastaviti rad jednofazno. Na sl. 2.82a. prikazan je trofazni asinhroni motor čiji je stator



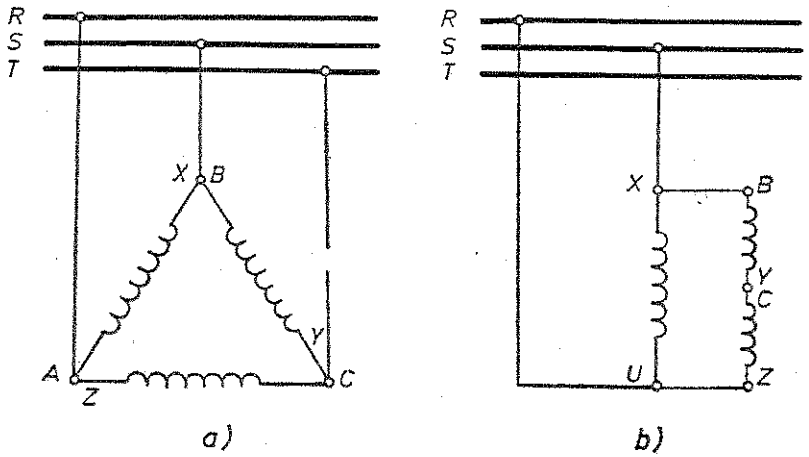
Sl. 2.82. Trofazni motor radi kao jednofazni — namotaji statora spojeni u zvijezdu

spojen u zvijezdu kod koga je fazni namotaj $C-Z$ u prekidu. Na taj način je motor ostao da radi s dva fazna namotaja koji su prostorno pomaknuti jedan od drugog za 120° i koji su priključeni jednofazno između faza A i B (sl. 2.82b). Između ovih faznih namotaja vlada jednofazni linijski napon U_{A-B}, koji kroz njih tjera jednofaznu naizmjeničnu struju.

Kada su namotaji statora spojeni u trougao (sl. 2.83a), situacija je slična samo onda ako je prekid nastao izvan trougla. Kako se sa sl. 2.83b. vidi, dva fazna namotaja su u seriji i spojena su paralelno sa trećim faznim namotajem.

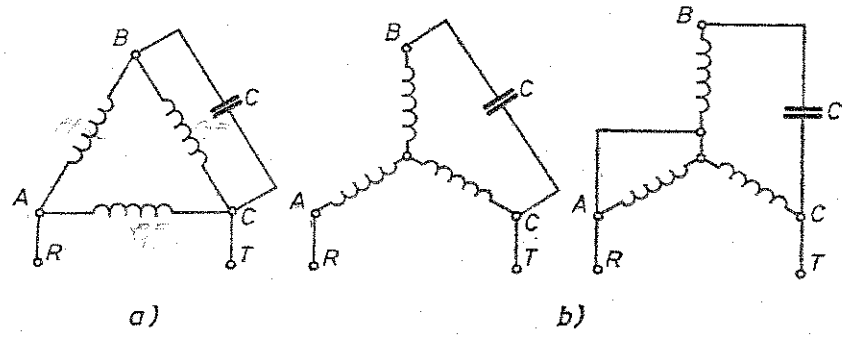
U oba navedena slučaja kroz fazne namotaje teče jednofazna naizmjenična struja i bez obzira što su namotaji prostorno pomaknuti, u motoru se stvara samo nepokretni pulzirajući magnetski tok. Mašina se, dakle, ponaša kao jednofazni asinhroni motor i on se ne može samostalno pokrenuti ako je prekid nastao prije priključenja na mrežu. Međutim, ako se prekid dogodi za vrijeme rada motora, on će produžiti rad jednofazno.

Treba zapamtiti da je ovakav jednofazni rad trofaznog motora opasan, jer motor razvija smanjenu snagu i budući da je preopterećen, može doći do oštećenja izolacije namotaja, odnosno do pregorijevanja. Da do toga ne bi došlo, trofazni asinhroni motor se osigurava toplinskim tropolno spojenim osiguračima, koji pri prekidu samo jedne faze svojim pregorijevanjem isključuju motor iz pogona.



Sl. 2.83. Trofazni motor radi kao jednofazni — namotaji statora spojeni u trougao

Međutim, trofazni asinhroni motor može se po potrebi upotrijebiti kao jednofazni, bez opasnosti da će doći do oštećenja izolacije namotaja. Tu mogućnost ostvarujemo pomoću kondenzatora kojim se jedan ili dva fazna namotaja pretvore u pomoćni namotaj, pa motor radi kao dvofazni. Ako je namotaj statora spojen u trougao, kondenzator se priključuje, kako je prikazano na sl. 2.84a, a ako je spojen u zvijezdu, priključuje se prema sl. 2.84b. Ovaj posljednji spoj je povoljniji od prethodnog, jer se kondenzator nalazi pod višim naponom (linijskim), pa povlači veću kapacitivnu struju, kojom se poboljšava faktor snage motora cos φ,



Sl. 2.84. Spajanje kondenzatora na trofazni asinhroni motor kada radi kao jednofazni: a) ako je namotaj statora spojen u trougao, b) ako je namotaj statora spojen u zvijezdu.

a time i njegov obrtni momenat. Kapacitet kondenzatora koji se upotrebljava u ove svrhe iznosi oko 70 μF po jednom kilovatu snage motora.

Trofazni motor upotrijebljen kao jednofazni opterećuje se za 20 do 30% manjom snagom od nominalne za trofazni motor. Pokretni momenat je malen i iznosi oko 35% nominalnog.

Promjena smjera okretanja vrši se zamjenom mjesta priključaka početaka i završetaka u glavnom ili pomoćnom namotaju.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Kada i gdje upotrebljavamo jednofazni asinhroni motor?
2. Objasni kako radi jednofazni asinhroni motor!
3. Koji problemi nastaju pri puštanju u rad jednofaznog asinhronog motora?
4. Koju ulogu ima pomoćni namotaj i njemu priključen dodatni otpor?
5. Koje jednofazne asinhrone motore nazivamo kondenzatorskim?
6. Kada u pomoćni namotaj stavljamo dva kondenzatora i kakva je njihova uloga?
7. Šta trebamo učiniti pa da trofazni asinhroni motor uspješno radi kao jednofazni?

MAŠINE ZA ISTOSMJERNU STRUJU

3.1. FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD MAŠINA ISTOSMJERNE STRUJE

3.1.1. Istorijski razvoj, sadašnja primjena i daljnja perspektiva

Mašine istosmjerne struje bile su prve električne mašine koje je čovjek konstruisao. Naime, prvi motor istosmjerne struje konstruisao je M. H. Jacobi već 1838. godine u Petrogradu. Taj motor napajan je električnom strujom iz galvanske baterije. To je zapravo u suštini mašina naizmjenične struje, ali pošto je kolektor njen sastavni dio, ipak je to mašina istosmjerne struje, jer su njene izlazne veličine istosmjerni napon i istosmjerna struja, a ako je mašina motor, onda su to ulazne veličine.

Mašina istosmjerne struje se naročito razvila u 19. vijeku, da bi svoj današnji oblik dobila u 20. vijeku. To su bili generatori (tzv. dinamo-mašine) u električnim centralama malih snaga, dok je do primjena motora došlo nešto kasnije.

Danas su se mašine istosmjerne struje zadržale u onim oblastima u kojima istosmjerna struja ima izrazitu prednost u odnosu na naizmjenični oblik električne energije. To su električna vuča (električne lokomotive, tramvaji, trolejbusi i dr.), metalurgija, određeni automatizirani elektromotorni pogoni i drugo. Generatori istosmjerne struje zadržali su svoj značaj i ulogu kao pobudni generatori u elektranama, kao agregati za punjenje akumulatora kao i generatori za električno zavarivanje.

Krajem 19. vijeka dolazi do razvoja tehnike naizmjeničnih struja, koja ima prednost pri prenosu na veću udaljenost i pruža mogućnost primjene asinhronih motora koji su, kako smo vidjeli, jednostavnije izvedbe, a uz to i jeftiniji. Izgledalo je da će mašine istosmjerne struje nestati iz upotrebe. Međutim, posljednjih tridesetak godina, otkako je otpočelo razdoblje automatizacije koja traži od elektromotornih pogona finu i brzu regulaciju brzine okretanja, motori istosmjerne struje u tome imaju prednost, a u nekim slučajevima i jedino moguće rješenje. Za mašine istosmjerne struje nastupila je nova era, i to ne u istosmjernim sistemima niti u istosmjernim generatorima, nego u razvoju istosmjernih elektromotornih pogona.

Istovremeno s razvojem automatizacije razvila se i tehnika poluprovodnika. Poluprovodnički ispravljači naizmjeničnu struju ispravljaju u istosmjernu s vrlo visokim stepenom korisnog djelovanja, čak do 99,5%.

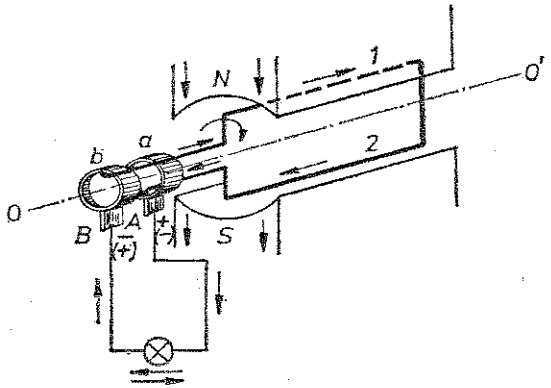
Novi sistem sastoji se od kombinovanog sistema generatora naizmjenične struje s prenosom i mrežama naizmjenične struje na koje preko ispravljača priključujemo motore istosmjerne struje. Zato su motori istosmjerne struje sa svojim povoljnim pogonskim karakteristikama ponovo dobili na važnosti.

Iz prethodnog izlaganja nije teško zaključiti da imamo dvije vrste mašina istosmjerne struje. To su *generatori* i *motori*. Generatori proizvode električnu energiju u vidu istosmjernog napona i struje, a motori troše električnu energiju istosmjernog napona i struje.

3.1.2. **Generatorski rad mašine**

Generatori istosmjerne struje su mašine koje pretvaraju mehaničku energiju u električnu istosmjernog napona. Napon se proizvodi redovito na principu elektromagnetske indukcije. To je najsigurniji i najekonomičniji način dobivanja napona kada se radi o pretvaranju znatnije mehaničke energije u električnu.

Princip rada. Da bismo proizveli indukovani napon, potrebno nam je da imamo magnetsko polje i provodnik koji se kreće u tom magnetskom polju. Uzećemo jedan stalan magnet i provodnik koji je stavljen između njegovih polova N i S, savijen tako da mu se oba kraja nalaze na jednoj strani. Tako savijeni provodnik dobiva već poznati oblik koji smo nazvali navojak. Krajeve navojka spajamo sa prstenovima a i b na koje naliježu četkice A i B. Na četkice je priključeno trošilo npr. sijalica, i tako je vanjsko kolo zatvoreno. Sve ovo predstavljeno je na sl. 3.1.



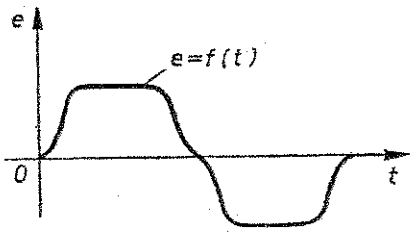
Sl. 3.1. Principijelna shema generatora naizmjenične struje

Zamislimo da se navojak okreće skupa s prstenovima oko zamišljene ose $O-O'$ stalnom brzinom u smjeru strelice, kako je prikazano na slici. Dakle, ispunjen je uslov za pojavu indukovanog napona. Posmatrajmo za sada samo jednu stranu navojka, tj. jedan provodnik označen sa 1 koji se nalazi u posmatranomi trenutku ispod sjevernog pola N. Budući da smjer magnetskog polja i posmatran

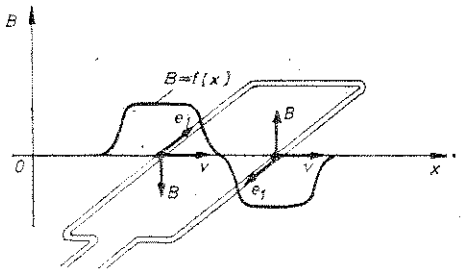
provodnik 1 zatvaraju međusobno pravi ugao, a ugao vektora brzine v i prema provodniku i prema polju je također pravi, to za indukovani napon iz osnova elektrotehnike vrijedi poznata jednačina

$$e_1 = Blv \text{ (V)} \qquad \ldots\ldots (3.1)$$

Smjer ovog indukovanog napona određujemo pravilom desne ruke koje glasi: postavi li se desna ruka u magnetsko polje tako da magnetske silnice ulaze u dlan (dlan okrenut prema sjevernom polu N), pokazuje li prst palac smjer okretanja navojka, ispruženi prst pokazaće smjer indukovanog napona. Ako primijenimo ovo pravilo na sl. 3.1., lako ćemo zaključiti da će provodnik 1 pod sjevernim polom imati indukovani napon jednog smjera (u našem slučaju od nas), a u isto vrijeme provodnik 2 pod južnim polom će imati indukovani napon drugog smjera (usmjeren prema nama).



Sl. 3.2. Indukovani napon u provodniku



Sl. 3.3. Raspodjela magnetne indukcije duž oboda rotora

Kada se navojak okrene za 180°, kada provodnik 1 dođe pod južni pol, u njemu će se promijeniti smjer indukovanog napona i biće suprotan onome koji je imao pod sjevernim polom, a isti koji je imao provodnik 2 kada se nalazio pod južnim polom, kako je prikazano na sl. 3.2. Posmatramo li dalje ove promjene smjera indukovanog napona, dolazimo do zaključka da se smjer indukovanog napona u jednom provodniku mijenja čim on promijeni magnetski pol. Također možemo konstatovati i to da je smjer indukovanog napona, a time i indukovane struje pod jednim magnetnim polom uvijek isti. Na sl. 3.3. prikazana je situacija magnetne indukcije u ravnini i shematski ucrtan navojak koji se vrti u magnetskom polju koje miruje. Kako se sa slike vidi, u odlaznom provodniku 1 i povratnom 2 indukuju se naponi iste vrijednosti (nalaze se u istom magnetskom polju), ali suprotnog smjera. No, pošto su provodnici navojka spojeni u seriju, njihovi indukovani naponi će se geometrijski sabrati, pa će u navojku indukovani napon imati dvostruku vrijednost:

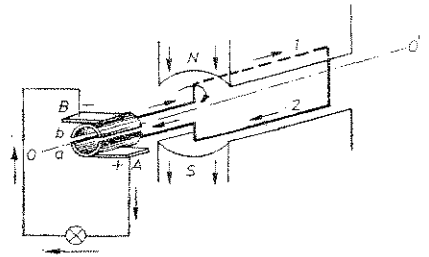
$$e_n = 2e_1 = 2Blv \qquad \ldots\ldots (3.2)$$

Kako je aktivna dužina provodnika stalna veličina, to pri konstantnoj obodnoj brzini proizvod lv predstavlja stalnu veličinu označenu konstantom k, pa formulu (3.1) možemo napisati u obliku:

$$e_1 = kB \qquad \ldots\ldots (3.3)$$

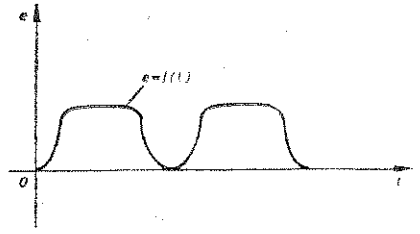
Ova formula pokazuje da je promjena indukovanog napona u provodniku određena isključivo karakterom raspodjele magnetne indukcije B u zračnom zazoru. To znači, krivulja promjene indukovanog napona u provodniku u funkciji vremena $e=f(t)$ vjerno prati krivulju promjene magnetne indukcije u prostoru $B=f(x)$ (sl. 3.3). Kao i u jednom provodniku tako i u navojku krivulja indukovanog napona ima isti vremenski oblik, tj. ona je naizmjenična. Isto tako, u vanjskom električnom kolu teče naizmjenična struja. Zakonitošću je utvrđeno da pojava indukovanog napona mora biti naizmjenična. Time je jasno dokazano da je nemoguće napraviti električnu mašinu u kojoj bi se proizvodila istosmjerna struja. Prema ovoj tvrdnji, mašina za istosmjernu struju proizvedenu naizmjeničnu struju na neki način mora pretvoriti u istosmjernu.

Osnov za pretvaranje naizmjenične struje u istosmjernu je u tome, a što smo ranije utvrdili, da u svim provodnicima pod jednim polom smjer indukovanog napona, a time i struje je uvijek isti. Ova zakonitost je iskorištena na taj način što su izbačeni prstenovi i umjesto njih stavljeni poluprstenovi (sl. 3.4). Četkice pri tome stoje nepomično, odnosno naliježu na poluprstenove koji se okreću skupa sa navojkom. Na jednom mjestu (pod jednim polom) svi provodnici imaju isti smjer indukovanog napona i indukovane struje, a pošto je četkica nepomična, ona će vući struju uvijek s jednog istog položaja provodnika, a to znači istosmjernu struju. Istosmjerni naponi i struja mijenjaće se između nulte vrijednosti i maksimuma, ali samo u jednom smjeru, kako je prikazano na sl. 3.5. Takva struja teći će u vanjskom električnom kolu, tj. kroz trošilo. Tako smo objasnili rad istosmjerne mašine kao generatora, naime, u mašini se proizvodi naizmjenični indukovani napon koji se pomoću poluprstenova i četkica mehaničkim putem pretvara u istosmjerni.

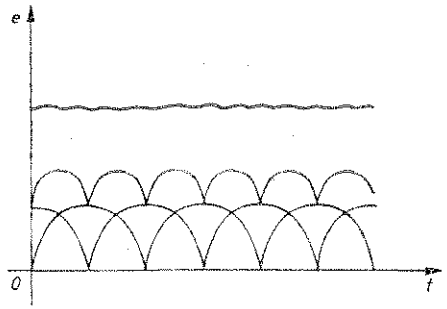


Sl. 3.4. Principijelna shema generatora istosmjerne struje

Da bismo dobili stalan napon između četkica, obrtni dio istosmjerne mašine (rotor) gradimo sa većim brojem navojaka, odnosno svitaka čije krajeve vežemo za jedan valjak (doboš) koji se sastoji od izolovanih dijelova — segmenata — lamela. Ovaj valjak



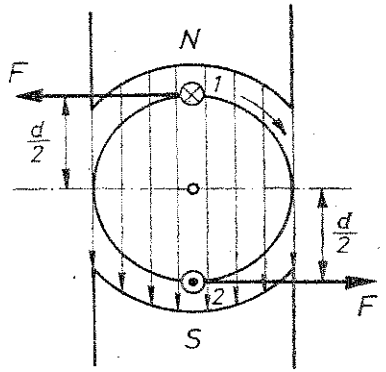
Sl. 3.5. Ispravljeni indukovani napon na četkicama



Sl. 3.6. Ispravljeni indukovani napon cijele mašine na četkicama

nazivamo *kolektor* ili *komutator*. U svim stranama svitaka indukovaće se napon naprijed opisanog oblika. Međutim, kako sve strane svitaka na dolaze istovremeno pod magnetni pol, nego u određenim vremenskim razmacima, to će i njihove krivulje indukovanih napona biti nešto pomaknute vremenski, kako je prikazano na sl. 3.6. Prema tome, na krajevima mašine s određenim brojem svitaka vladaće praktički stalan istosmjerni napon uslijed čega će u mreži teći istosmjerna struja stalne vrijednosti.

Otporni ili kočeći momenat. Prilikom razmatranja osnovnih principa stvaranja naizmjenične struje i pretvaranja te naizmjenične struje u istosmjernu, izgleda da treba samo okretati navojak i da će se dobiti jačina struje srazmjerna otporu vanjskog električnog kola. Međutim, pojave u električnoj mašini nisu time prestale. Naime, čim se električna struja pojavila u navojku, imamo slučaj provodnika kroz koji protiče struja, a nalazi se u magnetnom polju. Ispunjen je uslov za pojavu elektromagnetske sile koja djeluje na provodnik. Ta elektromagnetska sila F koja djeluje na provodnike navojka prikazana je na sl. 3.7.



Sl. 3.7. Elektromagnetska sila F koja djeluje na provodnike navojka kroz koje protiče električna struja

Veličina elektromagnetske sile F jednaka je i kod provodnika 1 i kod provodnika 2, pošto kroz njih protiču iste vrijednosti struje, pod uticajem su iste magnetske indukcije i iste su dužine. Dakle, $F=BlI$ (N). Prema tome, momenat sile jednog provodnika je:

$$M=F\frac{d}{2} \qquad \ldots\ldots (3.4)$$

Kako se sa slike vidi, momenti sila oba provodnika istog su smjera, pa ih možemo sabrati tako da dobijemo ukupni momenat sile navojka:

$$M_n=2F\frac{d}{2}$$

$$M_n=F\ d\ (\mathrm{Nm}) \qquad \ldots\ldots (3.5)$$

Kakav će biti smjer ovog momenta kada mašina radi kao generator? Smjer elektromagnetne sile, a time i momenta sile, isti je kao i smjer struje, tj. uvijek je takav da se protivi uzroku koji ga izaziva. U ovom slučaju pojavu struje a time i elektromagnetske sile izaziva okretanje navojka, pa je smjer elektromagnetske sile kao i momenta sile suprotan smjeru vrtnje navojka. Zaključujemo da je ovaj momenat sile *otporni* i zato ga nazivamo *otporni* ili *kočeći momenat*.

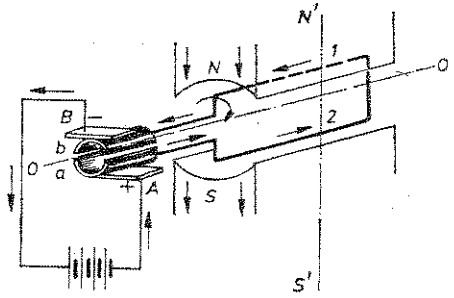
Kada će biti ovaj otporni momenat veći? Jasno je da će otporni momenat biti utoliko veći ukoliko uzimamo veću vrijednost struje iz generatora. To znači, što više opteretimo generator to je jača struja, a time veći i otporni momenat. Da bismo zadovoljili nastalo veće opterećenje generatora, pogonska mašina mora da savlada veći otporni momenat, što znači da je ona sve više opterećena. Na ovaj način se mehanička snaga pogonske mašine pretvara u električnu energiju.

Prema tome, imamo dvije pojave kod generatora, pojavu indukovanog napona i struje (dakle, ostvaruje električnu energiju) i pojavu otpornog momenta koji zahtijeva da za njegovo savladavanje dovedemo mehaničku snagu. Rezultat svega je da se dovedena mehanička snaga utrošila na savladavanje otpornog momenta i time omogućila okretanje navojka. Okretanjem navojka, kako već znamo, indukuje se napon od koga dobivamo u vanjskom kolu električnu struju. Da zaključimo: otporni ili kočeći momenat je automatska regulacija pretvaranja mehaničke energije u električnu.

3.1.3. **Motorski rad mašine**

Motori istosmjerne struje su mašine koje električnu energiju pretvaraju u mehaničku. Naime, oni preko svojih krajeva (četkica) primaju električnu energiju iz mreže koja se u mašini pretvara u magnetsku, a ona opet preko rotora, odnosno njegove osovine u mehaničku energiju.

Po svojoj konstrukciji ni po čemu se ne razlikuje od generatora istosmjerne struje. U načelu, svaka istosmjerna mašina je reverzibilna, tj. može da radi i kao motor i kao generator.



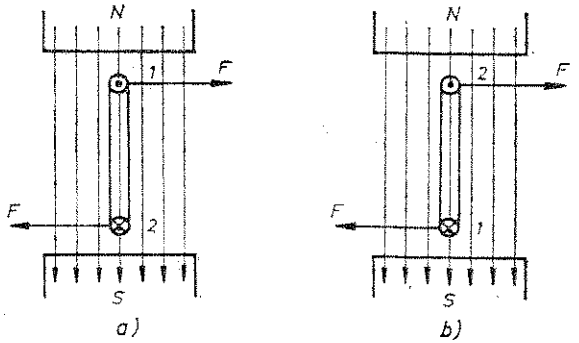
Sl. 3.8. Principijelna shema motora istosmjerne struje

Princip rada. Da bi mašina istosmjerne struje radila kao motor, četkice ćemo spojiti na izvor istosmjerne struje, kako je to prikazano na sl. 3.8. Pretpostavimo da silnice magnetskog polja imaju isti smjer kao ranije (sl. 3.4) i da navojak potpuno miruje. Dovođenjem istosmjernog napona na četkice u navojku će poteći struja u suprotnom smjeru od onog na sl. 3.4.

U momentu puštanja struje neka je provodnik 1 pod sjevernim polom, a poluprsten *b* pod četkom *B* koja je u vezi sa minus-polom baterije. U isto vrijeme provodnik 2 je pod južnim polom i poluprsten *a* pod četkom *A* koja je vezana sa plus—polom baterije. Ako navojak sa sl. 3.8. presiječemo u ravnini $N'-S'$, dobićemo presjek prikazan na sl. 3.9a. Vidimo, dakle, da imamo provodnik u obliku navojka kroz koji protiče struja, a nalazi se u magnetskom polju. Ostvarena je pojava elektromagnetskih sila koje stvaraju momenat sile i okreću navojak. Taj momenat ima suprotan smjer od onog kada je mašina radila kao generator (sl. 3.7) i to više nije otporni momenat nego *obrtni* ili *zakretni momenat* pod čijim djelovanjem navojak počinje da se vrti.

Smjer elektromagnetskih sila određujemo pravilom lijeve ruke koje glasi: ako lijevu ruku postavimo tako da magnetne linije padaju okomito na dlan, a ispruženi prsti pokazuju smjer struje u provodniku, ispruženi palac pokazaće smjer izbacivanja provodnika. Ovo pravilo provjeri na sl. 3.9.

Okrećući se, provodnik 2 odlazi ka sjevernom polu, a provodnik 1 prema južnom polu. Sa provodnikom 2 okreće se i njegov poluprsten *a*, a sa provodnikom 1 poluprsten *b*. Nakon okretaja od 180° situacija se izmijenila, tj. provodnik 2 je u



Sl. 3.9. Objašnjenje principa rada motora istosmjerne struje

vezi sa minus-polom baterije, a provodnik 1 u vezi sa plus-polom baterije. Vidimo da su provodnici promijenili magnetski pol, ali u isto vrijeme u provodnicima se promijenio smjer struje, kako je prikazano na sl. 3.9b. To je omogućilo da smjer elektromagnetnih sila kao i njihovi momenti pod oba magnetna pola ostanu isti. Kada toga ne bi bilo, navojak se ne bi okretao, nego bi samo podrhtavao.

Kada govorimo o principu nastanka indukovanog napona, a sada o načinu na koji dolazi do vrtnje, možemo zaključiti da i generatori i motori istosmjerne struje rade sa naizmjeničnom strujom, a da se električna energija prenosi pomoću istosmjerne struje. Kako je istosmjerna struja nepodesna za prenos zbog nemogućnosti transformacije, onda je jasno zašto je istosmjerna struja zamijenjena naizmjeničnom. Međutim, zbog svojih specifičnih osobina, neke mašine istosmjerne struje su i dalje ostale u primjeni, npr. serijski motori u električnoj vuči, kod dizalica itd., paralelni motori u industriji papira kao i generatori koji služe za pobudivanje sinhronih generatora, punjenja akumulatora itd.

Protu ili kontranapon. Kako smo vidjeli, motor će se okretati kada mu dovedemo električnu struju iz mreže. Što motor više opteretimo, on, da bi se okretao, treba da ima što veći obrtni momenat za razliku od otpornog momenta kod generatora koji se protivio okretanju. Elektromagnetna sila kod stalnog magnetskog polja utoliko je veća ukoliko je jača električna struja. To znači, da bi se motor pri većem opterećenju okretao, mora iz mreže vući sve jaču struju.

Okrećući se, navojak siječe silnice magnetskog polja, što u navojku urzokuje pojavu indukovanog napona. Ostaje nam još da vidimo kakav će smjer imati ovaj

indukovani napon. Kako odranije znamo, njegov smjer odredujemo pravilom desne ruke, na osnovu kojeg se jasno vidi da on nije taj koji stvara struju, već se on po Lencovom zakonu protivi uzroku svoga postanka, a njegov uzrok postanka je okretanje, odnosno dovedeni napon. Zato će indukovani napon biti suprotan dovedenom naponu i stoga ga nazivamo *protu* ili *kontranapon*, za razliku od indukovanog napona kod generatora.

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

3.1.4. **Jednačine osnovnih veličina mašina istosmjerne struje**

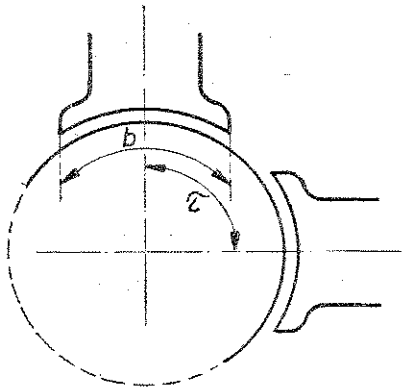
Jednačina za obrtni momenat. Vrijednost obrtnog mementa kod motora ili otpornog momenta kod generatora za jedan provodnik navojka, kako smo već naučili, jeste:

$$M_1 = F\frac{d}{2},$$

gdje je elektromagnetska sila

$$F = BlI_1 \qquad \ldots\ldots (3.6)$$

Međutim, na rotoru imamo N provodnika kroz koje protiče struja. U jednom momentu ne nalaze se svi provodnici pod uticajem magnetskog polja, odnosno svi provodnici u jednom momentu nisu aktivni. Aktivni provodnici su oni koji se nalaze pod polom, dok su provodnici između dva pola (u neutralnoj zoni) neaktivni.



Sl. 3.10. Uz objašnjenje odnosa provodnika pod širinom pola b prema polnom koraku τ

Odnos provodnika koji se nalaze pod širinom pola b prema ukupnom broju provodnika koji pripadaju polnom koraku τ (lučno rastojanje od početka jednog do početka drugog pola) predstavlja odnos broja aktivnih provodnika prema broju ukupnih provodnika koji pripadaju jednom polu b/τ, kako je prikazano na sl. 3.10. Pošto isti odnos vrijedi i za cijelu mašinu, množenjem odnosa sa ukupnim brojem provodnika N dobićemo ukupan broj aktivnih provodnika za cijelu mašinu u jednom momentu i on iznosi:

$$\frac{b}{\tau}N.$$

Sada će ukupan momenat elektromagnetne sile biti:

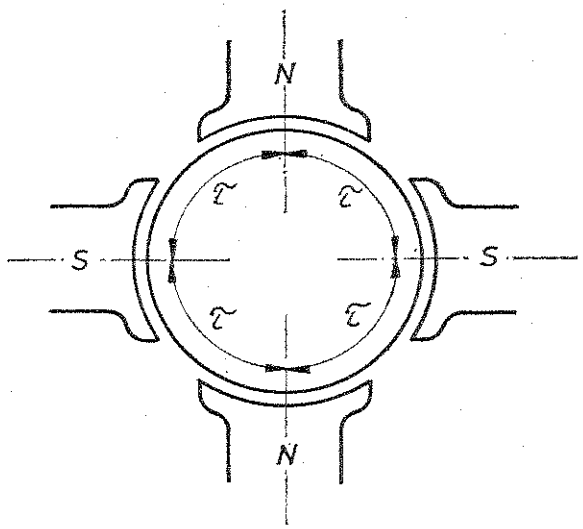
$$M = \frac{b}{\tau}NF\frac{d}{2} = \frac{b}{\tau}NBlI_1\frac{d}{2}.$$

Polni korak τ dobićemo dijeljenjem obima rotora $d\pi$ sa brojem polova $2p$. Dakle:

$$\tau = \frac{d\pi}{2p}.$$

Sa sl. 3.11, na kojoj je prikazana skica četveropolne mašine ($2p=4$), vidimo da dužinom cijelog obima rotora imamo onoliko polnih koraka τ koliko i polova $2p$, znači

$$\tau = \frac{d\pi}{4}.$$



Sl. 3.11. Skica četveropolne mašine

Uvrštavanjem izraza za τ u jednačinu za momenat elektromagnetne sile dobivamo:

$$M = \frac{b}{\frac{d\pi}{2p}}NBlI_1\frac{d}{2}.$$

Matematičkim uređenjem imamo:

$$M = \frac{2pb}{d\pi}\frac{d}{2}NBlI_1.$$

Skraćivanjem $\frac{2}{d}\ \frac{d}{2}$ dobivamo:

$$M = \frac{p}{\pi}BlbNI_1.$$

Proizvod $l \cdot b$ predstavlja površinu pola, tj. površinu kroz koju prolaze magnetske silnice. Imamo, znači, $S = l \cdot b$. Iz elektrotehnike nam je poznato da proizvod $B \cdot S$ predstavlja magnetski tok Φ (u našem slučaju uzet je magnetni tok Φ po polu), pa dobivamo:

$$M = \frac{p}{\pi} \Phi N I_1.$$

U gornjoj formuli struja I_1 je ona koja protiče kroz jedan, bilo koji provodnik rotora. Vrijednost jačine ukupne struje koju generator daje mreži ili je motor uzima iz mreže lako izmjerimo. Prema tome, struja kroz jedan provodnik, tj. kroz jednu granu rotora je:

$$I_1 = \frac{I}{2a},$$

gdje je:

I — ukupna vrijednost jačine struje

$2a$ — broj grana rotora (navojci vezani u seriju između dvije četkice čine jednu granu rotora).

Uvrštavanjem izraza za I_1 u formulu za momenat elektromagnetske sile dobivamo:

$$M = \frac{p}{2\pi a} \Phi N I.$$

Veličine $\frac{p}{2\pi a} N$ za bilo koju mašinu su stalne, pa ih zamjenjujemo jednom konstantom k_1, te je:

$$M = k_1 \Phi I \qquad \ldots\ldots (3.7)$$

Znači, *obrtni (elektromagnetni) momenat mašine M proporcionalan je korisnom magnetskom toku po polu statora* Φ i *struji rotora I.*

Kod motora momenat djeluje u smjeru obrtanja (struja ulazi u rotor iz mreže) i to je obrtni momenat, dok kod generatora djeluje u suprotnom smjeru (struja izlazi iz rotora) od okretanja rotora i zato ga nazivamo otporni momenat.

Jednačina za indukovani napon u rotoru. Kada smo govorili o principu rada generatora, utvrdili smo da je indukovani napon u jednom provodniku navojka:

$$e_1 = Blv$$

Da bismo dobili indukovani napon za cijelu mašinu, moramo prvo vidjeti kako se sabiraju indukovani naponi pojedinih provodnika.

Svi provodnici mašine podijeljeni su na više grupa (grana) rotora. Provodnici u jednoj grani rotora spojeni su u seriju, dok su pojedine grane rotora međusobno paralelno povezane. Iz toga proizlazi da se indukovani naponi provodnika u jednoj grani rotora sabiraju, ali ukupni indukovani napon jedne grane rotora je i ukupni indukovani napon za cijelu mašinu.

Kao i ranije, neka namotaj rotora sadrži N provodnika, onda će broj provodnika u jednoj grani rotora biti

$$\frac{N}{2a}.$$

Množeći gornji izraz sa odnosom b/τ, dobivamo broj aktivnih provodnika jedne grane rotora

$$\frac{b}{\tau} \frac{N}{2a}$$

Ako ovim brojem aktivnih provodnika jedne grane rotora pomnožimo izraz za indukovani napon jednog provodnika, dobićemo indukovani napon namotaja rotora (cijele mašine):

$$E = Blv \frac{b}{\tau} \frac{N}{2a}$$

Primjenjujući izraz za polni korak $\tau = d\pi/2p$ i uvrštavajući ga u gornju formulu, dobivamo:

$$E = Blv \frac{b}{\frac{d\pi}{2p}} \frac{N}{2a} = Blv 2p \frac{b}{d\pi} \frac{N}{2a}.$$

Pošto nam je poznato da je $b \cdot l = S$ i $BS = \Phi$ imamo:

$$E = \frac{N}{d\pi a} p \Phi v.$$

Zamjenjivanjem izraza za obodnu brzinu rotora $v = d\pi n/60$ u gornjoj jednačini i izvršenim skraćivanjem dobivamo:

$$E = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi.$$

Veličine $pN/60a$ za bilo koju mašinu su stalne, pa ih zamjenjujemo jednom konstantom k_2, te gornji izraz dobivamo u vrlo jednostavnom obliku:

$$E = k_2 \Phi n \qquad \ldots\ldots (3.8)$$

Znači, *indukovani napon namotaja rotora (cijele mašine) proporcionalan je korisnom magnetskom toku* Φ i *brzini okretanja rotora n.*

Kod generatora je ovo indukovani napon koji stvara struju, a kod motora protu ili kontranapon.

Jednačina napona. Utvrdili smo kolika je vrijednost indukovanog napona rotora ($E = k_2 \Phi n$). Postavlja se pitanje koliki je napon između četkica generatora, tj. napon na njegovim krajevima.

Kada se rotor generatora okreće stalnom brzinom i kada je njegovo kolo namotaja otvoreno, onda je napon na krajevima generatora jednak indukovanom naponu:

$$U_{go} = E \qquad \ldots\ldots (3.9)$$

Kažemo da je generator neopterećen ili u tzv. praznom hodu.

Ako se na krajeve generatora priključe trošila, tj. generator optereti, njegovim namotajima rotora poteći će struja, koja će nailazeći na aktivni (omski) otpor provodnika izazvati aktivni (omski) pad napona IR. Pad napona nastaje i uslijed magnetske reakcije rotora. To je uticaj polja rotora na glavno magnetsko polje (polje statora). Kako smo vidjeli, indukovani napon isključivo ovisi o glavnom magnetskom polju, to će njegovim slabljenjem biti umanjen indukovani napon, odnosno napon.

Prema tome, vanjski korisni napon na krajevima generatora manji je od indukovanog pri praznom hodu za omski pad napona IR i pad napona uslijed magnetske reakcije rotora U_r. Dakle:

$$U_g = E - IR - U_r \qquad \ldots\ldots (3.10)$$

Kod motora jednačina napona ima drugi oblik. Naime, sada je izvor struje vanjska električna mreža na čiji napon je priključen motor. Najveća veličina napona mreže, a time i napona motora U_m drži ravnotežu protunaponu E, omskom padu napona IR i padu napona usljed magnetske reakcije rotora U_r, te je:

$$U_m = E + IR + U_r \qquad \ldots\ldots (3.11)$$

Jednačina brzine okretanja motora. Kod motora protunapon E nikad ne može biti jednak dovedenom naponu, jer u rotoru uvijek, makar i kod najmanje struje dolazi do pada napona za koji je on manji od dovedenog napona. Dakle:

$$E = U_m - IR.$$

Uvrštavanjem u gornju jednačinu izraz za $E = k_2 \Phi n$ dobivamo

$$k_2 \Phi n = U_m - IR.$$

Odavde je jednačina za brzinu okretaja motora:

$$n = \frac{U_m - IR}{k_2 \Phi} \qquad \ldots\ldots (3.12)$$

Pošto je $E = U_m - IR$, konačna jednačina za brzinu okretanja rotora je:

$$n = \frac{1}{k_2} \frac{E}{\Phi} \qquad \ldots\ldots (3.13)$$

Ovo su jednačine osnovnih veličina pomoću kojih izvodimo osnovne zavisnosti mašina istosmjerne struje.

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

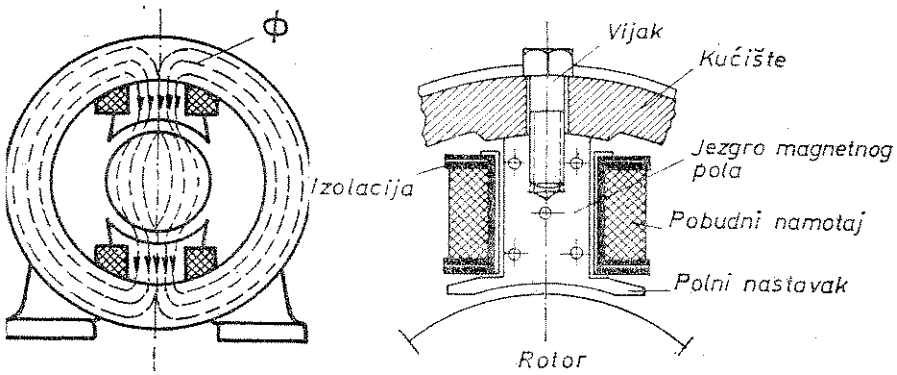
1. Kakvu ulogu i značaj imaju danas mašine istosmjerne struje?
2. Objasni generatorski rad mašine!
3. Objasni motorski rad mašine!
4. Kako nastaje otporni ili kočeći momenat i šta nam on pokazuje?
5. Kako nastaje protu ili kontranapon i kakva je njegova uloga?
6. Ne ulazeći u detalje izvoda, objasni od kojih veličina zavise indukovani napon generatora, obrtni momenat i brzina okretanja motora!

3.2. KONSTRUKTIVNA IZVEDBA MAŠINA ISTOSMJERNE STRUJE

3.2.1. Dijelovi mašina istosmjerne struje

Mašina istosmjerne struje sastavljena je od tri glavna dijela. To su: *stator*, *rotor* i *kolektor*.

Stator prikazan na sl. 3.12. je nepokretni dio mašine. Sastoji se od *kućišta (jarma)* i *magnetskih polova*. Kućište je napravljeno u obliku šupljeg valjka na čijoj se unutrašnjoj strani nalaze magnetni polovi. S obje strane stator je zatvoren sa jednim poklopcem koji mogu biti otvoreni ili zatvoreni, što ovisi o vrsti hlađenja



Sl. 3.12. Stator mašine istosmjerne struje: a) sastav i njegovo magnetno polje, b) magnetni pol i njegovi dijelovi.

mašine. Na poklopcima se nalaze ležišta za osovinu rotora. Kućište je napravljeno od lijevanog željeza, a kod velikih mašina od lijevanog ili valjanog čelika koji ima dobru magnetnu provodnost. Na donjem dijelu kućišta nalazi se postolje na koje je mašina postavljena.

Uopšte, u električnim mašinama potrebno je proizvesti snažna magnetna polja. Njih stvaramo pomoću elektromagneta (kod vrlo malih mašina polovi su *stalni — permanentni magneti*). *Elektromagneti — parovi magnetnih polova* sastoje se od *magnetskog jezgra* koje je produženo u tzv. *polne nastavke (papuče)* i od *magnetnog namotaja*.

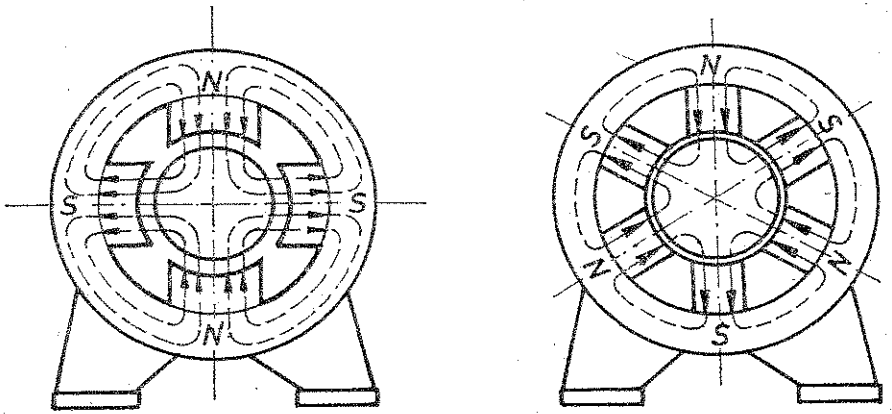
Magnetsko jezgro elektromagneta izrađeno je od tankih međusobno izolovanih dinamo-limova. Oblik mu je valjkast ili pravougaon. Prednost valjkaste jezgre je u tome što je izvedba namotaja jednostavna i što je presjek jezgre najoptimalnije iskorišten za prolaz silnica magnetnog toka. Nedostatak mu je što povećava dimenzije mašine. Polni nastavci ili polne papuče uvijek su napravljene od dinamo-limova, jer u njima mogu nastati vrtložne struje zbog blizine promjenljivog magnetskog toka rotora. Zadatak im je da što više i ravnomjernije obuhvate rotor, te da na

taj način što pravilnije rasporede silnice magnetskog polja na rotoru. Magnetski polovi su pomoću zavrtanja pričvršćeni za stator, a isto tako i polni nastavci za magnetsko jezgro, kako je prikazano na sl. 3.12b.

Magnetski namotaj, koga popularno nazivamo *pobudni* ili *uzbudni namotaj*, napajamo istosmjernom strujom koja stvara stalno magnetsko polje neophodno za rad mašine. Ova *struja* služi za *pobuđivanje magnetskih polova*, pa je zato nazivamo *strujom pobude* ili *uzbude*. Pobudni namotaji izvedeni su od izolovanih bakrenih provodnika okruglog (kod manjih mašina) i pravougaonog presjeka (kod većih mašina). Izrađuju se posebno u obliku svitka, pomoću šablone te kao gotovi postavljaju se na magnetsko jezgro. Smjer magnetnog polja magneta određen je smjerom struje kroz pobudni namotaj (pravilo desne ruke!).

Iz naprijed navedenog nije teško zaključiti koju ulogu, odnosno zadatak ima stator mašine. Pored zadatka da na sebi nosi magnetne polove i štiti unutrašnjost mašine od vanjskih povreda, glavna uloga mu je da provodi magnetne linije sila između polova. Njihov tok prikazan je također na sl. 3.12a. One izlaze iz sjevernog magnetnog pola N, prolaze kroz zračni zazor između polnih nastavaka i rotora, zatim preko rotora idu opet kroz zračni zazor u južni magnetni pol S, te se od južnog pola preko jarma statora vraćaju u sjeverni magnetni pol N, i tako je magnetno kolo zatvoreno. Da bi rasipanje magnetnih silnica bilo što manje, tj. da bi što veći broj magnetnih silnica prolazio kroz rotor, potrebno je da razmak između polnih nastavaka i oboda rotora bude što manji.

Dva pola, sjeverni N i južni S, čine *jedan par polova. Par polova čini jedan cijeli elektromagnet*. Prema tome, broj magnetnih polova mašina za istosmjernu struju uvijek je paran, koliko ima sjevernih toliko ima i južnih magnetnih polova. Mašina, znači, ima najmanje dva pola. *Prema broju polova, mašine istosmjerne struje dijelimo*

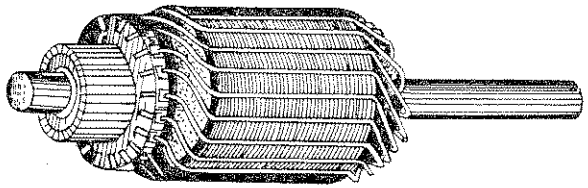


Sl. 3.13. Stator sa dva i tri para magnetnih polova

na *dvopolne*, *četveropolne*, *šesteropolne* itd. Kako se sa sl. 3.13. vidi, raspored magnetnih polova po obodu statora je naizmjeničan, pa ako npr. pođemo od sjevernog pola po obodu, imamo sljedeći red: $N-S-N-S-N$ itd.

Rotor je pokretni dio mašine. Sastoji se od *armature* sa *namotajima* i *osovine* (sl. 3.14). Armatura ima oblik punog valjka koji je s vanjske strane uzdužno ižlijebljen. U žlijebove ili utore smještaju se izolovani provodnici koji obrazuju namotaje. Armaturu nosi osovina koja se oslanja na dva ležišta koji se nalaze na poklopcima s obje strane statora. Rotor je, znači, smješten u šupljinu statora i može se slobodno okretati.

Struja u namotaju rotora, kako smo već ranije ustanovili, je naizmjenična, tako da je armatura rotora izložena stalnom premagnetisavanju i pojavi vrtložnih struja, uslijed čega dolazi do njenog zagrijavanja. Da bi se gubici nastali uslijed premagnetisavanja i vrtložnih struja smanjili (ne možemo ih u potpunosti otkloniti), potrebno je da armatura ima što manji *remanentni (zaostali)* magnetizam i da na neki način pruža znatan otpor vrtložnim strujama, a omogući što bolji put silnicama

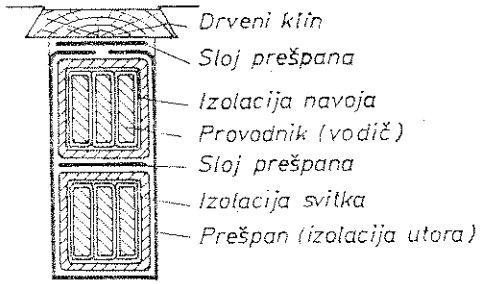


Sl. 3.14. Rotor mašine istosmjerne struje

magnetnog polja. To postižemo na taj način što armaturu izrađujemo od kružnih dinamo-limova međusobno izolovanih i postavljenih okomito na osovinu. Debljina limova kreće se od 0,3 do 0,5 mm. Izolacija između limova je papir, lak ili sloj nekog oksida.

Mašina se zagrijava kada radi. Uzrok zagrijavanja je uglavnom proticanje električne struje kroz namotaje. Pošto je zagrijavanje mašine opasno po izolaciju, a sa većim zagrijavanjem i gubici u mašini su veći, to je potrebno blagovremeno i stalno hlađenje. To postižemo strujanjem vazduha kroz proreze (kanale) koji se nalaze u armaturi duž osovine rotora. Pored toga, na bočnoj strani armature rotora, na istoj osovini gdje i rotor ugrađen je ventilator koji okretanjem stvara strujanje vazduha i time pojačava hlađenje mašine.

Utori u koje smještamo namotaje mogu biti različitog oblika, a najvažniji su otvoreni i poluzatvoreni. Na sl. 3.15. prikazan je jedan takav utor sa namotajem i izolacijom. S gornje strane stavljaju se drveni klinovi da štite namotaj od eventualnog ispadanja za vrijeme vrtnje rotora.

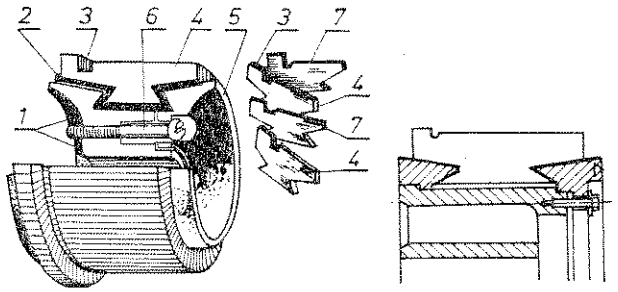


Sl. 3.15. Utor ili žlijeb rotora sa namotajem i izolacijom

Namotaji koji se stavljaju u izolovane utore napravljeni su od izolovane bakrene žice čiji oblik i presjek, kao i vrsta izolacije zavise od jačine struje koja teče kroz namotaje, odnosno napona pod kojim se namotaji nalaze. Kod mašina manjih jačina struja namotaj je od bakrene žice manjeg okruglog presjeka, a kod onih za veće

jačine struje upotrebljavaju se bakrene šipke većeg okruglog ili pravougaonog presjeka. Bakar za izradu namotaja je čisti elektrolitski bakar.

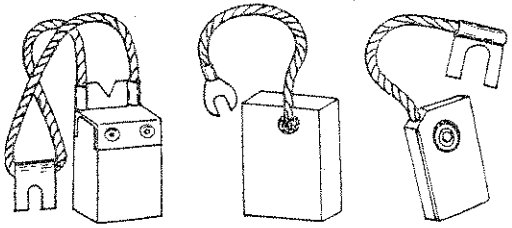
Kolektor ili komutator je važan dio mašine istosmjerne struje. Ima oblik punog valjka koji se nalazi na istoj osovini gdje i rotor (sl. 3.16). Sastoji se od velikog broja *bakrenih ploča*, tzv. *lamela*, koje su međusobno i prema željeznom tijelu izolovane. Za izolaciju se najčešće upotrebljavaju liskun i tinjac, tzv. kolektorski mikanit debljine 0,6 do 1,2 mm. Izolacija između lamela je potpuno jednaka i mora biti niža od samih lamela da ne bi došlo do stvaranja neravnina što bi izazvalo iskrenje, a time i oštećenje kolektora. S unutrašnje strane, kako je prikazano na sl. 3.16, lamele su pričvršćene u obliku lastinog repa. Učvršćenje lamela na valjak koji



Sl. 3.16. Kolektor ili komutator: 1 — tijelo od željeza, 2 — izolacija, 3 — prorez za spajanje kraja namotaja, 4 — lamela, 5 — stezni prsten, 6 — stezni vijak, 7 — izolacioni umetak.

je napravljen od lijevanog željeza vrši se pomoću steznih prstenova i metalnih vijaka. Spojna žica ili traka od namotaja rotora vežu se za lamelu kolektora lemljenjem.

Kolektor je najosjetljiviji dio mašine, pa se zbog toga veoma pažljivo obrađuje, sastavlja i održava. Ako se pojave neravnine na kolektoru ili za vrijeme rada mašine dođe do iskrenja, onda se čisti brusnim papirom pomoću drvene šablone koja ima krivinu kolektora. Ukoliko dođe do većeg oštećenja, vršimo tokarenje ili brušenje kolektora. U novije vrijeme se za brušenje upotrebljava brusna ploča vezana bakelitom. Nakon tokarenja ili brušenja klizne površine kolektor se polira pomoću brusnog papira.



Sl. 3.17. Četkice

Uz kolektor dolaze *četkice* ili *dirke* (sl. 3.17). One su nepokretne i moraju dobro nalijegati na kolektor. Zadatak im je da uspostavljaju trajnu električnu vezu između unutrašnjeg i vanjskog dijela električnog kola. Moraju biti mekše od kolektora, ne smiju stvarati veliko trenje te ne smiju predstavljati veliki otpor električnoj struji. Četkice su napravljene od ugljena i metala. U praksi se najčešće primjenjuje grafitni ugljen, zatim tvrdi ili presani ugljen kao i metalni ugljen pomiješan sa bakrom. U posljednje vrijeme sve više se upotrebljava elektrografitni ugljen.

S obzirom na materijal od koga su napravljene, imamo sljedeće vrste četkica:

— grafitne četkice se primjenjuju kod mašina koje rade sa čestim udarima električne struje i sa lošom komutacijom,

— ugljeno-grafitne četkice su tvrđe od grafitnih, a primjenjuju se kao i prethodne,

— četkice od tvrdog ugljena su tvrde i dosta dobre za sve motore snage do 15 kW i 500 V,

— bakarno-grafitne četkice su napravljene od smjese praha bakra i grafita; pogodne su za mašine niskog napona do 30 V,

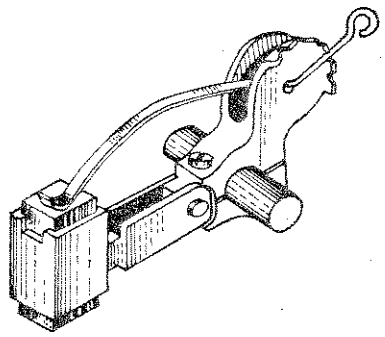
— metalne četkice napravljene od bakrenog užeta sa upresanim grafitom su podesne za vrlo velike struje niskog napona,

— elektrografitne četkice dobijene žarenjem presanog uglja najčešće su u primjeni.

Kod mašina većih vrijednosti struja nisu dovoljne samo dvije četkice. Koliko mašina ima polova toliko treba da ima i četkica. Polovina četkica je električki pozitivna, a druga polovina je električki negativna; naizmjenično su raspoređene po obodu kolektora. Sve pozitivne četkice vezane su uporedo u jedan čvor — pozitivni pol, a sve negativne u drugi čvor — negativni pol mašine.

Na vrhu, četkica je utisnuta u metalnu kapu spojenu bakarnim savitljivim užetom za vezu sa prstenom koji paralelno vezuje sve četkice istog polariteta. Prstenovi se nalaze po strani kolektora, a izolovani su međusobno i prema kućištu mašine. Čitav sistem prstenova sa čvorovima, odnosno sa držačima i četkicama može se po potrebi radijalno pomicati i vijkom utvrditi u određeni položaj.

Uz četkice idu i *držači četkica* (sl. 3.18). Četkice su smještene u držače četkica tako da su okomite na kolektor ili eventualno malo nagnute u smjeru okretanja rotora. Svaku četkicu pritiskuje na kolektor opruga određenim pritiskom, što ovisi o tvrdoći četkica i pogonskih prilika mašine. Pritisak na četkicu mora biti pravilan, u protivnom četkica ne naliježe dobro na kolektor pa dolazi do iskrenja. Ukoliko je pritisak velik, nastaje povećano trenje, pojačano zagrijavanje pa i brže trošenje četkica i kolektora.



Sl. 3.18. Držač sa četkicom

3.2.2. **Namotaji mašina istosmjerne struje**

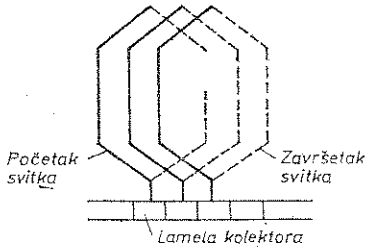
Kada smo govorili o namotajima asinhronih mašina, upoznali smo neke pojmove koji su isti ili slični kod namotaja mašina istosmjerne struje. To su: navojak, svitak, polni korak, navojni korak itd., a posebno način prikazivanja. U ovom poglavlju obradićemo namotaj rotora (armaturni namotaj) i njegov način izvedbe. On

se razlikuje od naizmjeničnog namotaja po tome što je zatvoren uvijek sam u sebe. Umjesto na izvode, namotaj je spojen na kolektor.

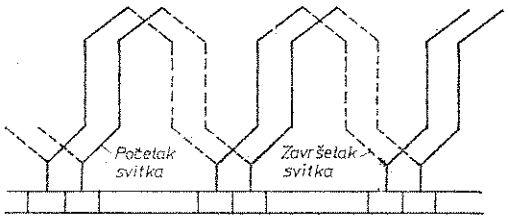
Osnovni pojmovi. *Skup svitaka koji su po određenom pravilu raspoređeni i smješteni po jedan ili više njih u utore rotora čine namotaj rotora ili armaturni namotaj istosmjerne mašine.*

Svaki svitak je svojim početkom i završetkom spojen na po jednu lamelu kolektora. Bez obzira na broj navojaka, svitak ima, kako smo već ranije utvrdili, dvije aktivne strane koje su smještene u utore i dvije neaktivne ili čeone strane. Čeonim stranama svitka povezujemo njegove aktivne strane. Razlikujemo *prednju i zadnju čeonu stranu svitka*, pri čemu je *prednja čeona strana okrenuta prema kolektoru.*

Kod mašina istosmjerne struje najčešće se upotrebljavaju dvoslojni namotaji. Kao i kod mašina naizmjenične struje, svaki svitak ima jednu stranu u gornjem, a drugu u donjem sloju utora. *Onu stranu svitka koja se nalazi u gornjem sloju nazivamo početnom, a onu koja leži u donjem sloju završnom stranom svitka.*



Sl. 3.19. Način spajanja svitaka kod petljastog namotaja



Sl. 3.20. Način spajanja svitaka kod valovitog namotaja

Spojimo li susjedne svitke, nastaće petljasti namotaj čiji je princip kretanja prikazan na sl. 3.19. *Kada se završetak svitka ne vraća na početak svitka jednog od susjednih svitaka nego napreduje dalje u smjeru koraka svitka dobivamo valoviti namotaj* prikazan na sl. 3.20.

Svici namotaja spajaju se jedan sa drugim na taj način da se početak slijedećeg susjednog svitka spaja sa završetkom prethodnog svitka na jednu (zajedničku) lamelu kolektora. To znači, na svaku lamelu kolektora spajamo početak jednog i završetak drugog svitka. Iz tog izlazi da je ukupni broj lamela kolektora k jednak ukupnom broju svitaka namotaja S, tj.:

$$k = S \qquad \ldots\ldots (3.14)$$

Kod najjednostavnijeg dvoslojnog namotaja u svakom utoru nalaze se dvije strane svitaka, jedna u gornjem a druga u donjem sloju. U tom slučaju broj utora rotora Z jednak je broju svitaka S. Dakle:

$$Z = S \qquad \ldots\ldots (3.15)$$

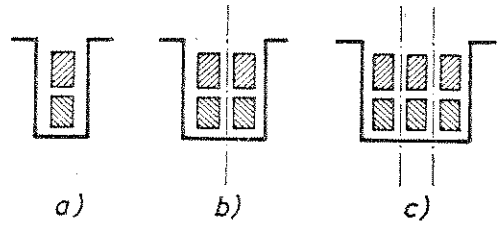
Da bi se izbjegao previsok napon između susjednih lamela kolektora, rotor treba izvesti sa velikim brojem utora.

Međutim, rotor izveden sa većim brojem utora nije pogodan, jer bi tada utori bili vrlo uski. Pošto bi znatan dio površine tako uskih utora ispunjavala izolacija svitaka od jezgra rotora, ostalo bi za provodnike malo mjesta, uslijed čega bi se znatno izgubilo na snazi mašine.

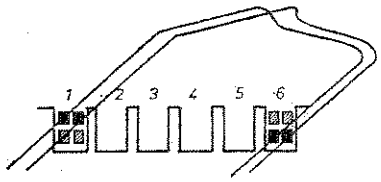
Iz pomenutih razloga, praktički, u svaki sloj utora smještamo više strana svitaka, kako je prikazano na sl. 3.21. U tom slučaju vrijedi jednakost:

$$k = S = z_e \cdot Z \qquad \ldots\ldots (3.16)$$

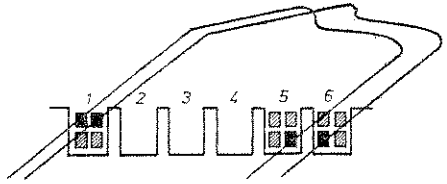
Ovdje uvodimo novi pojam tzv. *osnovnog* ili *elementarnog utora* z_e. Njega obrazujemo na taj način što dvije aktivne strane različitih svitaka smještamo jednu iznad druge (u gornjem i donjem sloju) (sl. 3.21a). Ukoliko stvarni utor sadržava 4,6 i više aktivnih strana, onda ga možemo razdijeliti na 2,3 i više elementarnih utora, kako to pokazuju isprekidane linije na sl. 3.21b. i c. To praktično znači da se u jednom utoru nalazi više svitaka. Pri tome svi svici namotaja mogu imati istu širinu, kako je prikazano na sl. 3.22. ili dio svitaka namotaja može imati manju, a dio veću širinu (sl. 3.23). U prvom slučaju tako izveden namotaj nazivamo namotaj s jednakim svicima, a u drugom slučaju nazivamo ga stepenasti. Iako je izvedba stepenastog namotaja složenija, radi dobre komutacije vrlo se često primjenjuje u mašinama većih snaga.



Sl. 3.21. Stvarni utori koji se sastoje od: a) jednog elementarnog utora ($z_e = 1$), b) dva elementarna utora ($z_e = 2$), c) tri elementarna utora ($z_e = 3$).



Sl. 3.22. Namotaj rotora s jednakim svicima (širina svitaka je ista)



Sl. 3.23. Namotaji rotora s nejednakim svicima, tzv. stepenasti namotaj

Iz ovog izlazi da će ukupni broj elementarnih utora na rotoru biti:

$$Z_e = z_e Z = S = k \qquad \ldots\ldots (3.17)$$

Da bi pravilno smjestili namotaj u utore rotora, potrebno je znati razmake na koje se rasporeduju aktivne strane svitaka. *Ti razmaci* nazivaju se *navojni koraci namotaja.*

Razmak između *aktivnih strana istog svitka* nazivamo *prvi* ili *osnovni navojni korak namotaja po rotoru* i označava se sa y. Neki ga nazivaju i *korakom svitka.* On mora biti približno jednak polnom koraku ($y_1 \approx \tau$).

Razmak između *završne strane nekog svitka* i *početne strane narednog svitka* nazivamo *drugi* ili *spojni navojni korak* i označava se sa y_2.

Rezultantni ili *ukupni navojni korak namotaja* koji označavamo sa y predstavlja *razmak* između *odgovarajućih aktivnih strana (početnih* ili *završnih) dvaju svitaka* koji slijede jedan iza drugog. Dobije se, dakle, kao rezultat prelaženja prvog i drugog navojnog koraka, tj.:

$$y=y_1+y_2 \qquad \ldots\ldots (3.18)$$

Sva tri navojna koraka (prvi, drugi i rezultantni) izražavaju se brojem elementarnih utora.

Dijelu oboda rotora koji pripada jednom polnom koraku τ pripada $Z_e/2p$ elementarnih utora. Vrlo često ukupni broj elementarnih utora rotora Z_e nije djeljiv sa $2p$ bez ostatka i zbog toga da bi osnovni navojni korak y_1 imao cijeli broj elementarnih utora, određujemo ga izrazom:

$$y_1=\frac{Z_e}{2p}\pm\varepsilon=\text{cijeli broj} \qquad \ldots\ldots (3.19)$$

gdje je ε broj koji pokazuje za koji dio elementarnog utora moramo da produžimo ili skratimo polni korak da bi navojni korak y_1 bio izražen cijelim brojem.

Razmak između kolektorskih lamela, na koje su spojeni početak i završetak svitka, izražen brojem lamela kolektora naziva se *korakom namotaja po kolektoru* ili, *jednostavno, kolektorskim korakom* i označava se sa y_k. Pošto je ukupni broj lamela kolektora jednak ukupnom broju svitaka namotaja $k=S$ formula 3.14, neophodno je da ukupni navojni korak namotaja y brojčano bude jednak kolektorskom koraku y_k. Dakle:

$$y=y_k \qquad \ldots\ldots (3.20)$$

Uvažavajući sve ove osnovne pojmove a naročito formule 3.18, 3.19. i 3.20. koje su iste za sve tipove namotaja, rotorske namotaje dijelimo na:

— *petljaste (paralelne)* i

— *valovite (serijske).*

I jedni i drugi mogu biti jednostavni i složeni. Jednostavni namotaji čine uvijek samo jedan zatvoren sistem provodnika, dok složeni obrazuju jedan ili više takvih sistema.

Jednostavni petljasti namotaj. *Kada početak i završetak svakog svitka spojimo za dvije uzastopne lamele kolektora, dobivamo jednostavni petljasti namotaj* prikazan na sl. 3.24. Predstavljena su dva načina serijskog spajanja jednostavnog petljastog namotaja. Na sl. 3.24a. drugi (naredni) svitak koji slijedi iza prvog (prethodnog) leži desno od njega i naziva se *desnovojni* ili *neukršteni*, dok na sl. 3.24b. leži lijevo i naziva se *lijevovojni* ili *ukršteni*. U prvom slučaju spojen je završetak prvog svitka sa lamelom 2, a u drugom slučaju s posljednjom (k-tom lamelom). Na slici je pokazano kako nastaju navojni koraci i kakav je njihov međusobni odnos. Prije nego što utvrdimo njihov odnos, usvojićemo da je desni smjer kretanja po obodu rotora pozitivan. Pošto se kod petljastog namotaja pri prelazu od završne strane prethodnog svitka prema početnoj strani narednog svitka kretanje vrši u lijevu stranu (lijevi smjer kretanja), navojni korak y_2 uzimamo kao negativan broj.

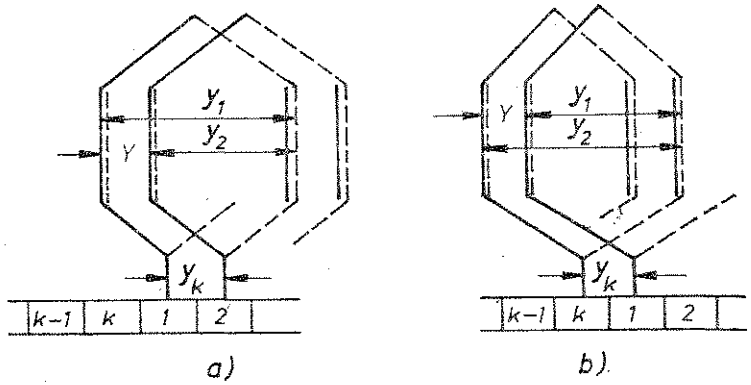
Kada je korak svitka y_1 veći od spojnog koraka y_2 i kada korak namotaja prema relaciji 3.18. ima pozitivan predznak ($y_1-y_2>0$), neće doći do ukrštanja glave svitka

sa povratnim provodnikom, dok će doći do ukrštanja onda kada je korak svitka manji od spojnog koraka i kada ima negativan predznak ($y_1-y_2<0$).

Zbog kraćih spojeva strana svitaka najčešće se primjenjuju desnovojni neukršteni petljasti namotaji.

Iz ovog što smo kazali te iz osnovne definicije jednostavnog petljastog namotaja proizlazi njegovo važno svojstvo:

$$y=y_k\pm1 \qquad \ldots\ldots (3.21)$$



Sl. 3.24. Koraci petljastog namotaja: a) desnovojni ili neukršteni ($y_1-y_2>0$), $y_k=+1$, b) lijevovojni ili ukršteni ($y_1-y_2<0$), $y_k=-1$.

Prvi navojni korak ili korak svitka y_1 određujemo prema formuli 3.19, dok ćemo drugi ili spojni korak y_2 odrediti prema općoj formuli 3.18. Dakle:

$$y_2=y-y_1=\pm1-y_1 \qquad \ldots\ldots (3.22)$$

Na jednom primjeru pokazaćemo kako se izvodi jednostavan petljasti namotaj.

Primjer 1

Nacrtaj razvijenu shemu jednostavnog jednovojnog neukrštenog petljastog namotaja rotora četveropolne mašine istosmjerne struje sa svicima jednakog oblika. Zadati su sljedeći podaci: $Z=18$, $p=2$, $z_e=1$, $k=z_eZ=18$.

Rješenje

Prije nego što pređemo na crtanje razvijene sheme namotaja, moramo izračunati osnovne podatke na osnovu kojih ćemo obrazovati namotaj.

Najprije ćemo odrediti navojne korake namotaja.

Prvi navojni korak je:

$$y_1=\frac{Z_r}{2p}\pm\varepsilon=\frac{18}{4}\pm\frac{2}{4}=5 \text{ ili } 4.$$

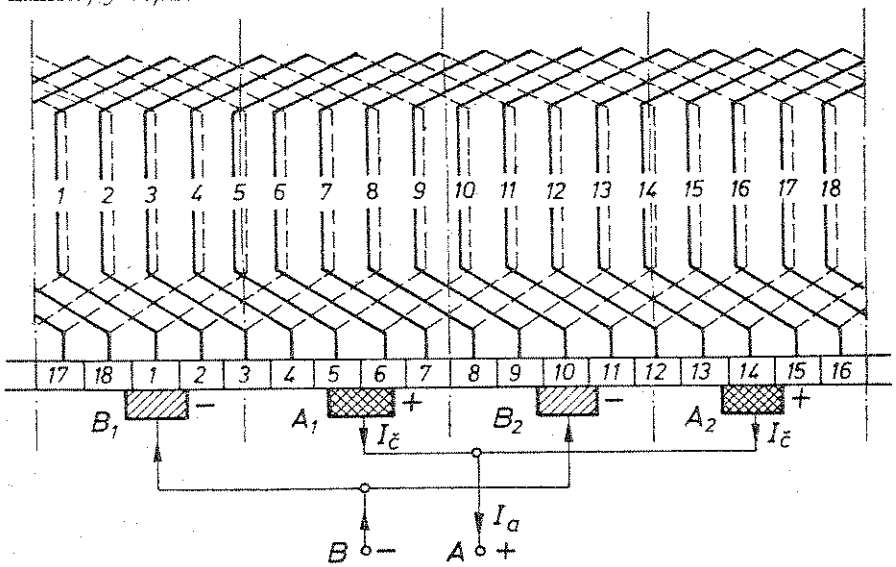
Biramo $y_1=5$ utora

Pošto je $y=y_k=+1$ (neukršteni namotaj), spojni korak biće:

$$y_2=y-y_1=1-5=-4.$$

Označimo brojevima lamele kolektora razvijenog u ravnini svitke namotaja i utore u koje se oni smještaju i od utora 1, koristeći se izračunatim navojnim koracima, crtamo razvijenu shemu dok se namotaj sam u sebe ne zatvori, kako je prikazano na sl. 3.25.

Prilikom crtanja razvijene sheme ustanovili smo da je namotaj jednovojni, jer smo samo jednom obišli rotor, dok se namotaj sam u sebe zatvorio. Za ovo svojstvo namotaja odlučujući je korak namotaja y. Nije teško zaključiti da bismo više puta morali s namotajem obilaziti rotor kad bi korak namotaja bio veći od 1, jer bi nam ostajali nepopunjeni utori i lamele kod prvog obilaska. Zato je svaki petljasti namotaj y-vojan.



Sl. 3.25. Razvijena shema jednostavnog jednovojnog neukrštenog petljastog namotaja: $Z=18$, $p=2$, $z_e=1$, $k=z_eZ=18$.

Posmatrajmo mašinu u radu u jednom određenom momentu. Neka položaj četkica za taj momenat odgovara onom na shemi, gdje su ucrtane i neutralne zone. Pratimo li smjer označenih struja, vidimo da četkice rastavljaju namotaj na četiri paralelne grane. Zaključujemo da namotaj u našem primjeru ima onoliko paralelnih grana koliko glavnih polova ima mašina, tj.

$$2a=2p \qquad \ldots\ldots (3.23)$$

Zbog ovoga se petljasti namotaj često naziva i paralelni.

Pod svakim polom nalazi se jedna grana namotaja, a četkica dijeli granu od grane. Zbog toga je potrebno da kod mašine s petljastim namotajem četkice budu smještene u svaku neutralnu zonu. Odmah je jasnija i raspodjela struja kod mašine s petljastim namotajem. Za struje koje prolaze četkicom vrijedi:

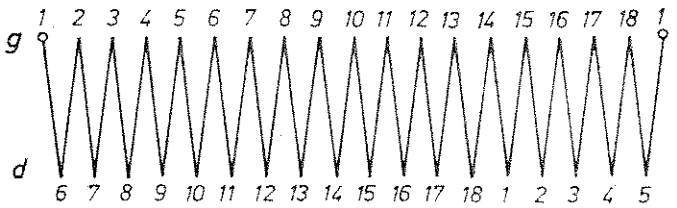
$$I_č=\frac{I_r}{p} \qquad \ldots\ldots (3.24)$$

dok je struja u svakoj paralelnoj grani namotaja, odnosno u provodniku paralelne grane

$$I_g=\frac{I_r}{2a} \qquad \ldots\ldots (3.25)$$

gdje je I_r ukupna struja rotora.

Način prikazivanja namotaja razvijenom shemom na sl. 3.25. je vrlo tačan i primjenjuje ga gotovo sva literatura. Međutim, u praksi se može primjenjivati jednostavniji i vrlo pregledan način prikazivanja namotaja. Na sl. 3.26. predstavljen



Sl. 3.26. Pojednostavljeni način prikazivanja sheme namotaja za primjer sa sl. 3.25: g — gornji sloj strana svitka, d — donji sloj strana svitka.

je pojednostavljen način prikazivanja sheme namotaja za primjer sa sl. 3.25. Sa „g" je označen gornji sloj strana svitka, a sa „d" donji. Brojevima su označeni položaji strana svitaka ili lamela. Linijom desno dolje (u našem primjeru linija 1—6, 2—7, 3—8 itd.) označen je prvi korak (korak svitka) y_1, a desno gore (linija 6—2, 7—3, 8—4 itd.) označen je drugi ili spojni korak y_2. U daljem izlaganju služićemo se pojednostavljenim prikazom namotaja.

Primjeri za vježbu:

Primjer 1

Nacrtaj pojednostavljenu shemu jednostavnog ukrštenog petljastog namotaja rotora četveropolne mašine istosmjerne struje sa svicima jednakog oblika. Zadati podaci su: $Z=18$, $p=2$, $z_e=1$, $k=z_eZ=18$, $y_1=4$, $y_2=5$. Uporedi s prethodnim primjerom i uoči razliku!

Primjer 2

Nacrtaj pojednostavljenu shemu jednostavnog ukrštenog petljastog namotaja rotora četveropolne mašine istosmjerne struje sa svicima jednakog oblika. Zadati podaci su: $Z=18$, $p=2$, $z_e=1$, $k=z_eZ=18$, $y_1=5$, $y_2=3$.

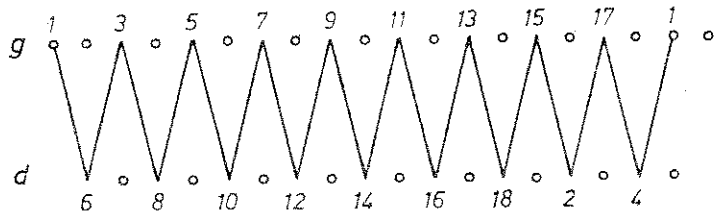
Da bismo uspješno riješili postavljeni zadatak, prvo izračunamo navojni korak namotaja y.

$$y=y_1-y_2=5-3=2$$

Krenemo li svitkom od položaja ($1+y_1=6$, $6-y_2=3$, $3+y_1=8$, $8-y_2=5$ itd.), uočavamo da u gornjem sloju prelazimo samo položaje svitaka neparnog rednog broja, a u donjem sloju samo parnog rednog broja. Nakon jednog obilaska rotora zatvori se namotaj sam u sebe ispunivši samo polovicu raspoloživih utora za namotaj. Na sl. 3.27. namotaj je izvučen punom linijom. Za vježbu u preostale

slobodne utore crtkanom linijom smjesti još jedan namotaj i označi brojevima gornje i donje slojeve pojedinih utora.

Kod položenih četkica ovaj namotaj će imati osam paralelnih grana, što je i razumljivo ako ga zamislimo kao dva međusobno paralelna jednovojna namotaja sa po četiri paralelne grane. Nije teško zaključiti da bi trovojni namotaj imao 12 paralelnih grana. Uopšte, y-vojni namotaj će imati

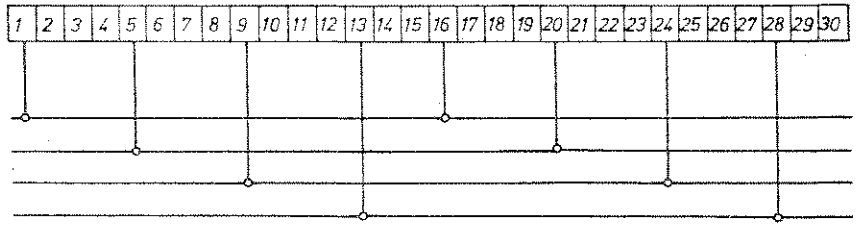


Sl. 3.27. Pojednostavljena shema jednostavnog dvovojnog neukrštenog petljastog namotaja: $Z=18$, $p=2$, $z_0=1$, $k=z_0Z=18$, $y_1=5$, $y_2=3$

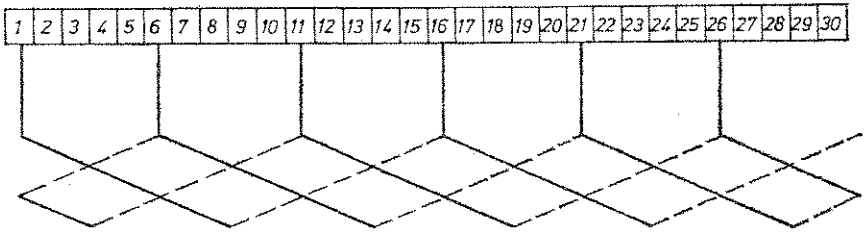
$$2a=2y\,(y) \qquad \ldots\ldots\ (3.26)$$

paralelnih grana. Ova formula vrijedi za bilo koji petljasti namotaj, dok je formula 3.25. samo njen specijalni slučaj.

Spojke izjednačenja. Postavljanjem četkica svaki petljasti namotaj dijeli se prema formuli 3.24. na $2py$ paralelnih grana. Jedna grana nalazi se uvijek samo pod jednim polom mašine. U svim paralelnim granama mašine ne indukuju se isti naponi. Razlog je u tome što kod tehnički izrađenih mašina nastaju razlike u veličini zračnog zazora, razlike u permeabilnosti željeznih dijelova, u ispunjenju prostora



Sl. 3.28. Spojke izjednačenja: izvedba u obliku prstena

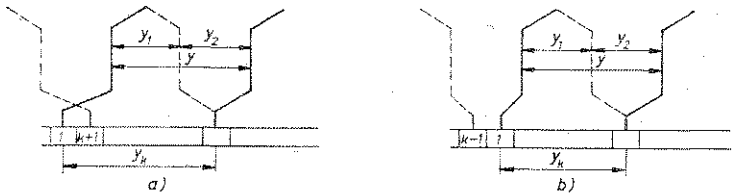


Sl. 3.29. Spojke izjednačenja: izvedba u obliku dvoslojnog namotaja

limovima itd., naravno, sve u granicama tolerancije važećih propisa. Posljedica svih ovih uticaja je mogućnost nastajanja nejednakog magnetskog toka pod raznim polovima, a time i razlike indukovanog napona u pojedinim granama. Usljed te razlike napona, provodnicima i preko četkica teku struje izjednačenja. One su vrlo štetne, jer povećavaju padove napona, smanjuju snagu mašine, jer beskorisno teku namotajima, zagrijavaju ih i konačno izazivaju iskrenje na kolektoru. Sve ovo znatno ublažavamo *„spojkama izjednačenja"*, koje se gotovo redovno ugrađuju u sve višepolne mašine s petljastim namotajem. To činimo na taj način da se paralelne grane na tačkama jednakog potencijala međusobno spoje provodnom vezom, tako da struje izjednačenja ne teku preko četkica.

Presjek spojki izjednačenja napravljenih od bakra odabiremo obično u granicama između 50 i 100% presjeka provodnika u namotaju. Spojke izjednačenja se priključuju ili na glave namotaja ili na kolektor. Izvode se u obliku prstena s izvodima koji idu na namotaj ili kolektor, kako je predstavljeno na sl. 3.28. ili u obliku dvoslojnog namotaja predstavljenog na sl. 3.29. Korak spojki izjednačenja mora biti 360 električnih stepeni.

Jednostavni valoviti namotaj. *Kada početak i završetak svakog svitka spojimo za dvije lamele kolektora koje su udaljene jedna od druge za dvostruki polni korak* $y_K \approx k/p$, dobivamo *jednostavni valoviti namotaj* prikazan na sl. 3.30. Razlika u namatanju prema petljastom namotaju je u tome što se stalno ide naprijed po



Sl. 3.30. Koraci valovitog namotaja: a) desnovojni ili ukršteni, b) lijevovojni ili neukršteni.

obodu rotora i kolektota, tj. spojni korak se ne vraća nego produžava smjer kretanja koraka svitka. Električki to znači da se jedna grana valovitog namotaja ne nalazi geometrijski pod jednim polom, kako je to slučaj kod petljastog namotaja, već se nalazi pod svim polovima, jer svakim novim korakom namotaja, prema formuli 3.18, dolazi pod slijedeći par polova. Prema tome, napon u svakoj grani valovitog namotaja se indukuje ispod svih, a ne samo ispod jednog pola, što za sobom povlači niz karakterističnih razlika u odnosu na petljasti namotaj.

Izvodeći jednostavni valoviti namotaj pri svakom obilasku rotora, u njegove utore smješta se onoliko svitaka koliko pari polova ima mašina. Pri tome, završna strana posljednjeg svitka pri svakom obilasku spaja se sa lamelom koja se nalazi desno ili lijevo od polazne lamele. U prvom slučaju smo dobili ukršteni namotaj (sl. 3.30a), a u drugom neukršteni (sl. 3.30b).

Zbog spomenutog rasporeda svitaka koji slijede jedan iza drugog rezultantni korak y i kolektorski korak y_K znatno su veći nego kod petljastog namotaja. Budući da su dva direktno spojena svitka smještena na razmaku dvostrukog polnog koraka, rezultantni korak i kolektorski korak moraju također biti jednaki dvostrukom polnom koraku.

Iz svega navedenog zaključujemo da je dužina jednog obilaženja određena rezultantnim korakom y i brojem pari polova p. Dakle:

$$py=k \qquad \ldots\ldots (3.27)$$

Da bi se postiglo višestruko obilaženje rotora prije nego što se namotaj zatvori sam u sebe, potrebno je da namotaj nakon prvog obilaska dođe u neki od položaja bliže početnom svitku, npr. u prvi položaj ispred ili iza početnog. Proizvod py moramo uvećati ili samnjiti za 1. Slijedi $py=k\pm1$, odakle dobijamo korak namotaja

$$y_k=y=\frac{k\pm1}{p} \qquad \ldots\ldots (3.28)$$

Znak + pokazuje da drugo obilaženje počinje desno od početne lamele i takav valoviti namotaj je desnovojni ili ukršteni, dok znak − pokazuje da drugo obilaženje počinje lijevo od početne lamele i to je lijevovojni ili neukršteni valoviti namotaj.

Pošto $y_k=y$ treba da bude cijeli broj, ukupni broj kolektorskih lamela k ne može da bude proizvoljno odabran. Obično se k bira tako da bude $y_k=(k-1)/p=$ =cijeli broj. Pošto je u ovom slučaju utrošak bakra manji, to se ovaj lijevovojni neukršteni valoviti namotaj najčešće primjenjuje.

Prvi navojni korak jednostavnog valovitog namotaja y_1 određuje se prema opštoj formuli 3.19, dok drugi korak ovog namotaja y_2 dopunjuje prvi navojni korak do rezultantnog koraka namotaja y. Dakle:

$$y=y_1+y_2 \qquad \ldots\ldots (3.29)$$

Kako se izvodi jednostavni valoviti namotaj pokazaćemo na jednom primjeru.

Primjer 1

Nacrtaj razvijenu shemu jednostavnog ukrštenog valovitog namotaja rotora četveropolne mašine istosmjerne struje. Zadati su sljedeći podaci: $Z=19$, $p=2$, $z_e=1$, $Z_e=k=S=19$.

Rješenje

Prema prethodno datim formulama izračunavamo:

$$y_k=y=\frac{k\pm1}{p}=\frac{19\pm1}{2}=10 \text{ ili } 9,$$

što ovisi o upotrebljenom predznaku + ili −. Odlučili smo se za korak namotaja $y=10$, što odgovara predznaku + koji pokazuje da je namotaj desnovojni ili ukršteni.

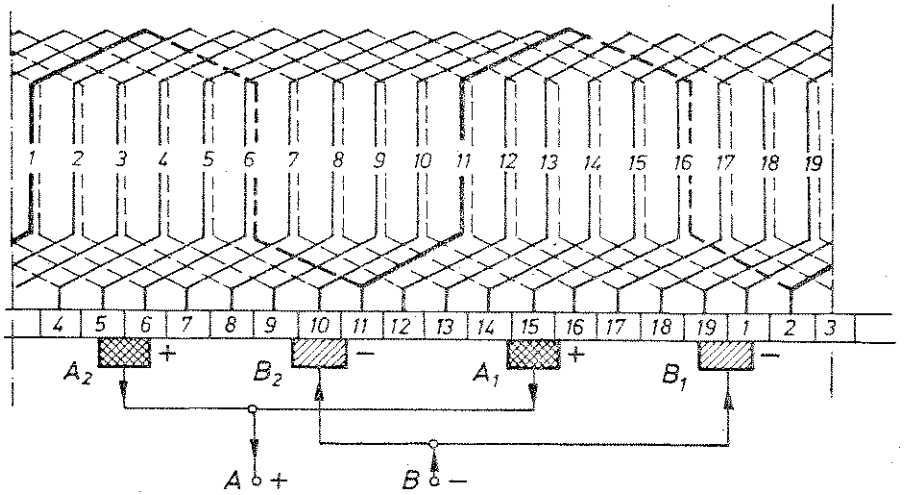
Prvi navojni korak je:

$$y_1=\frac{Z_e}{2p}\pm\varepsilon=\frac{19}{4}+\frac{1}{4}=5.$$

Prema formuli 3.29, drugi navojni korak je:

$$y_2=y-y_1=10-5=5.$$

Izvođenje namotaja kao i do sada počinjemo od kolektorske lamele 1 na koju spajamo početnu stranu (gornji sloj) prvog svitka, a ona je smještena u utoru 1. Završnu stranu (donji sloj) ovog svitka smještamo u utor $1+y_1=1+5=6$ i spajamo je sa lamelom $1+y_k=1+10=11$; iz lamele 11 na koju spajamo početnu stranu drugog svitka koja je smještena u utoru 11 idemo sa završnom stranom ovog svitka u utor $11+y_1=11+5=16$ i spajamo je sa lamelom $11+y_k=11+10=21$. Pošto imamo samo 19 lamela, to znači da spajanje vršimo sa lamelom 2 i time se namotaj zatvorio sam u sebe. Kako se vidi, drugo obilaženje počećemo od lamele 2 koja se nalazi desno od početne lamele 1, što potvrđuje da se radi o desnovojnom ukrštenom namotaju. Na sl. 3.31. prikazana je kompletna razvijena shema jednostavnog ukršte-



Sl. 3.31. Razvijena shema jednostavnog ukrštenog valovitog namotaja: $Z=19$, $p=2$, $z_e=1$ $Z_e=k=S=19$

nog valovitog namotaja. Četkice su položene na kolektor u nekom proizvoljnom momentu vrtnje i nalaze se u neutralnoj zoni kolektora. Uzima se da je širina četkice jednaka širini kolektorske lamele. Pratimo li smjer označenih struja, vidimo da namotaj ima samo dvije paralelne grane. U našem primjeru jedna se nalazi između četkica B_2 i A_2, a druga između četkica B_1 i A_1.

Uopšte, kod jednostavnog valovitog namotaja broj paralelnih grana $2a$ ne zavisi od broja glavnih polova mašine i uvijek je jednak samo 2. Dakle:

$$2a=2 \text{ ili } a=1 \qquad \ldots\ldots (3.30)$$

Zbog ovoga se valoviti namotaj naziva još i serijski.

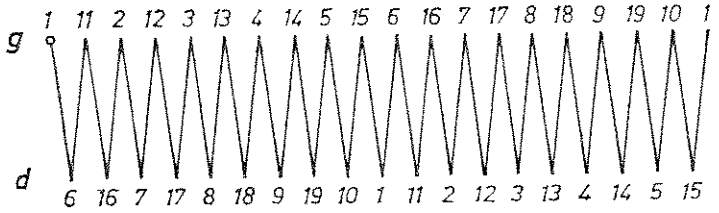
Pomoću uređaja na kolektoru mogli bismo se koristiti samo dvjema četkicama, npr. A_1B_1 (kao što se to radi kod tramvajskih motora). Međutim, obično se odabere puni broj četkica koji je jednak broju polova mašine, i to radi smanjenja dimenzija kolektora i bolje simetrije namotaja.

Na sl. 3.32. predstavljena je pojednostavljena shema namotaja za primjer sa sl. 3.31.

Primjeri za vježbu:

Primjer 1

Nacrtaj pojednostavljenu shemu jednostavnog neukrštenog namotaja rotora četveropolne mašine istosmjerne struje. Zadati su sljedeći podaci: $Z=15$, $p=2$, $z_e=1$, $Z_e=k=S=15$. Obrati pažnju prilikom određivanja navojnih koraka da je namotaj neukršten!



Sl. 3.32. Pojednostavljena shema valovitog namotaja za primjer sa sl. 3.31.

Spojke izjednačenja. Može se postaviti pitanje da li su spojke izjednačenja uopšte potrebne kod valovitog namotaja, pošto kod njega zbog prostornog rasporeda ne postoji uticaj nejednakog zračnog zazora. One se ipak postavljaju kod namotaja čiji je broj pari paralelnih grana veći od 1. Razlog je što su parovi paralelnih grana više puta u sebe zatvorenog namotaja nezavisnog potencijala sve dok se četkice ne spuste na kolektor. Spuštene četkice dovode ih na isti potencijal. Aktivni otpori pojedinih grana kao i prelazni otpori s kolektora na četkice nisu uvijek sasvim jednaki. Ovo je uzrok nejednakih opterećenja, odnosno zagrijavanja namotaja i pogoršanja komutacije. Dakle, spojke izjednačenja se ipak postavljaju, a izvedba se vrši po istom principu kao kod petljastih namotaja.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Od čega se sastoji stator istosmjerne mašine i koja je njegova uloga?
2. Kako je izveden rotor i koja je njegova uloga?
3. Od čega je napravljen kolektor i kakva je njegova uloga kada mašina radi kao generator, a kakva kada mašina radi kao motor?
4. Koji zadatak imaju četkice i njihovi držači?
5. Kako trebamo spojiti svitke da dobijemo petljasti namotaj? Na nacrtanoj principijelnoj shemi ovog namotaja odredi korak namatanja, spojni korak i rezultantni navojni korak!
6. Kako trebamo spojiti svitke da dobijemo valoviti namotaj? Odredi gore pomenute navojne korake!
7. Kakvu ulogu imaju spojke izjednačenja kod petljastog namotaja, a kakvu kod valovitog?

3.3. VRSTE I OSOBINE GENERATORA ISTOSMJERNE STRUJE

3.3.1. Pojam i način pobuđivanja

Osobine generatora istosmjerne struje određene su načinom pobuđivanja (uzbuđivanja) magnetnih polova. Pod pojmom pobuđivanja podrazumijevamo stvaranje magnetskog polja u generatoru koje je potrebno da bi se u namotaju rotora prilikom njegove vrtnje indukovao potreban napon. To polje možemo proizvesti pomoću stalnih (permanentnih) magneta ili pomoću elektromagneta.

Stalni magneti stvaraju slaba magnetska polja, pa su te mašine vrlo malih snaga (od nekoliko vata do nekoliko stotina vata). Nazivaju se magnetoelektrične mašine. Primjenjuju se u induktorima za mjerenje otpora.

Za dobivanje snažnih magnetskih polja koja su potrebna kod industrijskih mašina velikih snaga upotrebljavamo elektromagnete. Kroz namotaje elektromagneta propuštamo istosmjernu struju koja pobuđuje magnetske polove i zato je nazivamo pobudnom ili uzbudnom strujom. Ovu struju u namotaje magnetskih polova možemo dovesti iz nekog stranog (zasebnog) izvora istosmjerne struje ili je uzimamo iz sopstvenog generatora.

3.3.2. Vrste generatora istosmjerne struje

Zavisno od načina pobuđivanja, tj. s obzirom na porijeklo struje pobude kojom se napaja pobudni namotaj, generatore istosmjerne struje dijelimo na:

— *generatore sa stranom* ili *nazavisnom pobudom* i
— *generatore sa sopstvenom* ili *samopobudom.*

Kod generatora sa nezavisnom pobudom pobudni namotaj napaja se iz stranog izvora istosmjerne struje koji mogu biti akumulatorska baterija, mali generator istosmjerne struje ili već postojeća mreža istosmjerne struje.

Kod generatora sa sopstvenom ili samopobudom pobudni namotaj napaja se neposredno iz samog generatora. Snaga koja se troši na pobudi je vrlo mala i iznosi do 5% nominalne snage mašine.

Prema načinu spajanja pobudnog namotaja sa namotajem rotora, generatore sa sopstvenom pobudom dijelimo na:

— *generatore sa paralelnom (porednom, otočnom) pobudom,*
— *generatore sa serijskom (rednom) pobudom,*
— *generatore sa složenom (kompaund) pobudom.*

3.3.3. Osobine generatora istosmjerne struje

Radne osobine generatora istosmjerne struje mogu se vrlo lako predvidjeti kada se zna kakva zavisnost postoji između nekih njegovih veličina kao što su pobudna struja, indukovani napon, napon na krajevima generatora itd.

Da bi se predviđanja obistinila, radne osobine pojedinih vrsta generatora najbolje ćemo upoznati pomoću krivulja koje pokazuju kako se ponaša indukovani napon $E=k\Phi n$ (3.6), odnosno napon na krajevima generatora $U_g=E-IR-U_r$ (3.8), pri promjeni jačine struje pobude, odnosno opterećenja. Te krivulje nazivamo karakteristike generatora, a najvažnije su:

— *karakteristika praznog hoda*, koja pokazuje kako se pri neopterećenom generatoru ($I=0$) i pri stalnoj brzini okretanja njegova rotora ($n=$const.) mijenja indukovani napon generatora E kad se mijenja struja pobude I_p. Dakle:

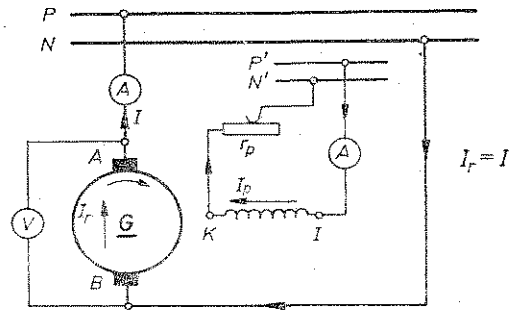
$$E=f(I_p) \quad \text{pri } I=0 \quad \text{i} \quad n=\text{const.} \qquad \ldots\ldots (3.31)$$

— *vanjska* ili *spoljna karakteristika*, koja pokazuje zavisnost napona na krajevima generatora U od struje opterećenja I. Pri tome u kolu struje pobude uključen je otpor stalne vrijednosti ($r_p=$const.), tako da struja pobude ima stalnu vrijednost:

$$U=f(I) \quad \text{pri } r_p=\text{const.} \quad \text{i} \quad n=\text{const.} \qquad \ldots\ldots (3.32)$$

3.3.4. **Generator sa nezavisnom pobudom**

To je generator kod koga neovisno o rotoru pobudnu struju dovodimo u pobudni namotaj iz posebnog izvora $P'N'$, kako je prikazano na sl. 3.33. U seriju sa pobudnim namotajem čiji su krajevi (stezaljke) označene sa IK spojen je promjenljivi otpornik r_p pomoću koga se može mijenjati vrijednost pobudne struje I_p. Generator proizvodi istosmjernu struju koja iz rotora preko četkica A i B teče u mrežu PN.



Sl. 3.33. Shema generatora istosmjerne struje sa nezavisnom pobudom

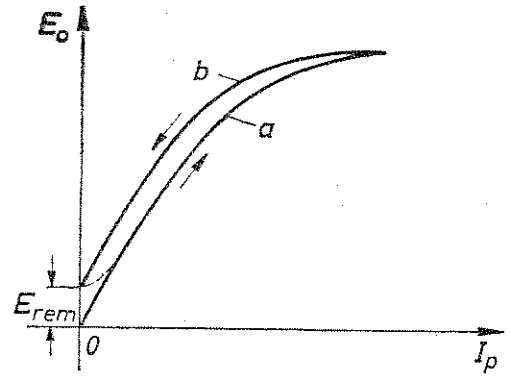
Razmotrimo sada osobine ovog generatora kada je neopterećen (u praznom hodu) i promjenljivo opterećen, tj. snimimo krivulje pri tim stanjima.

Karakteristika praznog hoda. Budući da je pri neopterećenom generatoru kolo namotaja rotora otvoreno, struja mreže i struja rotora biće jednake nuli. Pošto namotajem rotora ne teče struja ($I_r=0$), onda u njemu neće biti ni pada napona ($I_rR_r=0$). Uslijed toga, napon praznog hoda U_0 koji vlada na krajevima generatora jednak je proizvedenom indukovanom naponu E_0 unutar generatora ($U_0=E_0$). Iz izraza $E=k_2\Phi n$, pri $n=$const., vidimo da je proizvedeni napon E_0 direktno srazmjeran sa magnetskim tokom Φ, tj. $E_0=U_0=f(\Phi)$. Pošto magnetski tok Φ zavisi samo od vrijednosti pobudne struje I_p, karakteristika praznog hoda biće $E_0=U_0=f(I_p)$.

Krivulja se dobije na taj način što vrijednosti za indukovani napon E_0 nanosimo na ordinatnu os, a na os apscise vrijednosti pobudne struje I_p koje dobijemo mjerenjem. Struju pobude I_p mijenjamo podešavanjem otpora otpornika r_p. Svakoj vrijednosti I_p odgovara po jedna vrijednost E_0. Nizom mjerenja dobijemo niz tačaka koje povezane linijom daju karakterističnu krivulju koja je prikazana na sl. 3.34.

Krivulja se sastoji od krive (a) dobijene pri povećanju struje pobude I_p od nule do vrijednosti pri kojoj vrijednost indukovanog napona iznosi $\approx 1{,}25U_n$. Porast indukovanog napona E_0 ide do određene granice, jer dolazi do zasićenja željeza. Struju pobude I_p možemo i dalje povećavati, ali će indukovani napon

praktički ostati na već postignutoj vrijednosti. Kriva (b) nastaje smanjenjem struje pobude I_p do nule. Proces teče u suprotnom smjeru, pri čemu se vrijednost indukovanog napona E_0 smanjuje. Pri tome se kriva (b) koju nazivamo *silaznom granom karakteristike*, nalazi iznad krive (a) koja se naziva *uzlazna grana karakteristike*. To što se krivulja pri smanjenju struje pobude ne vraća istim putem objašnjava se postojanjem zaostalog (remanentnog) magnetizma u magnetskom kolu mašine. Kao karakteristika praznog hoda upotrebljava se uzlazna grana. Praktično, ona ne počinje od nule (početka koordinatnog sistema), već od neke vrijednosti E_{rem} na slici prikazane isprekidanom linijom. Napon E_{rem} koji je u namotaju rotora indukovan zaostalim magnetizmom je vrlo mali i iznosi $2\div 5\%U_n$.

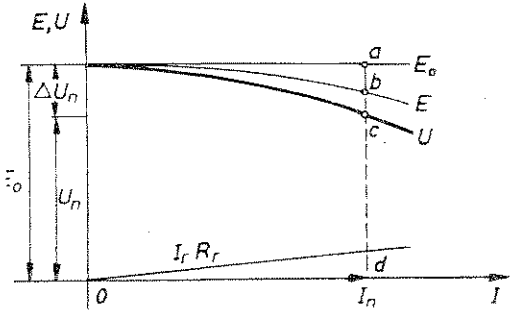


Sl. 3.34. Karakteristika praznog hoda generatora sa nezavisnom pobudom

Dobivena krivulja, u stvari, predstavlja promjenu indukovanog napona E_0 u praznom hodu generatora kao funkcija pobudne struje I_p, pa se stoga i zove karakteristika praznog hoda generatora. Ista krivulja samo u drugom mjerilu predstavlja i magnetski tok Φ kao funkciju pobudne struje I_p ($\Phi=f(I_p)$). Zbog toga je krivulja praznog hoda slična krivulji magnetiziranja.

Karakteristika praznog hoda pokazuje kolika je zasićenost magnetskog kola mašine pri nominalnom naponu. Kod dobro izvedenih mašina tačka koja odgovara nominalnom naponu nalazi se na dijelu krivulje koja se povija.

Vanjska karakteristika. Da bismo snimili ovu karakteristiku, potrebno je, dok je generator neopterećen, pobudnu struju povećati toliko dok se na krajevima generatora ne postigne vrijednost nominalnog indukovanog napona E_0. U toku pokusa otpor u kolu pobudnog namotaja r_p i brzina okretanja rotora n imaju stalnu vrijednost.



Sl. 3.35. Vanjska karakteristika generatora sa nezavisnom pobudom

Karakteristika se naziva vanjska zbog toga što karakteriše zavisnost vanjskih veličina (napona na krajevima generatora U i struje opterećenja I), a važna je jer određuje radne osobine generatora.

Polazeći od osnovne jednačine generatora (3.10) $U_g=E_0-I_rR_r-U_r$, objasnićemo oblik vanjske karakteristike prikazan na sl. 3.35. Naime, dok je generator neopterećen, na njegovim krajevima imaćemo napon E_0 koji na dijagramu odgova-

ra dužini $\overline{ad}$ ($E_0=\overline{ad}$). Opteretimo li generator nominalnom strujom I_n, nastaće pad napona uslijed magnetske reakcije rotora $U_r=\overline{ab}$ i pad napona na unutrašnjem otporu kola namotaja rotora $I_rR_r=\overline{bc}$. Dakle, pri nominalnoj struji opterećenja I_n na krajevima generatora imaćemo umanjeni indukovani napon E_0 za ukupne padove napona ΔU_n ($U_n=E_0-\Delta U_n$).

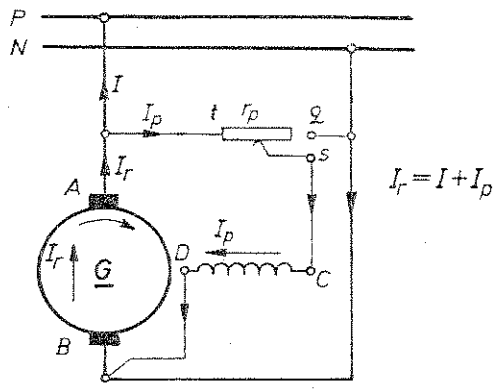
Pošto su indukovani napon E i otpor namotaja rotora R_r stalne veličine, to će napon sa povećanjem opterećenja opadati linearno.

Iz svega izloženog vidljivo je da napon generatora sa povećanjem opterećenja stalno opada. To opadanje iznosi nekoliko postotaka od ukupne vrijedosti napona, pa se uopšte može kazati da generatori sa nezavisnom pobudom imaju približno stalan napon bez obzira na promjenu opterećenja. Ovakve radne osobine generatora upravo odgovaraju trošilima kojima treba stalan napon, npr. rasvjeti, pogonu elektromotora itd. No, i to neznatno opadanje napona na krajevima generatora može se jednostavno nadoknaditi na taj način da se s porastom opterećenja istovremeno poveća vrijednost struje pobude I_p pomoću promjenljivog otpora r_p koji se nalazi u kolu struje pobude.

Snaga koja se troši na pobudu obično ne prelazi granicu od $1\div3\%$ snage generatora. Nezavisna pobuda je vrlo rasprostranjena i primjenjuje se kod generatora veoma malog napona (4 do 12 V), visokog napona (više od 500 V), u generatorima velike snage i u slučajevima kada trebamo regulaciju napona u širokim granicama.

3.3.5. Generator sa paralelnom pobudom

Generator sa paralelnom pobudom je vrsta samopobudnog generatora kod koga je pobudni namotaj paralelno spojen sa namotajem rotora, kako je to prikazano na sl. 3.36. Struja proizvedena u namotaju rotora I_r dijeli se na struju I koja teče prema trošilima u vanjsko kolo i na struju I_p koja teče pobudnim namotajem ($I_r=I+I_p$). Kako se vidi, pobudna struja I_p je dio proizvedene struje koja predstavlja gubitak za vanjsko kolo, te se nastoji da ona bude što manja (iznosi od $2\div3\%I_r$). Da bi pobudna struja bila što manja, a da se kod toga još uvijek dobije odgovarajući magnetski tok Φ u generatoru, pobudni namotaj se izvodi sa velikim brojem navoja. Kako je pobudni namotaj spojen na puni napon, to je potrebno da on ima veliki aktivni otpor, što se postiže malim presjekom provodnika.



Sl. 3.36. Shema generatora sa paralelnom pobudom

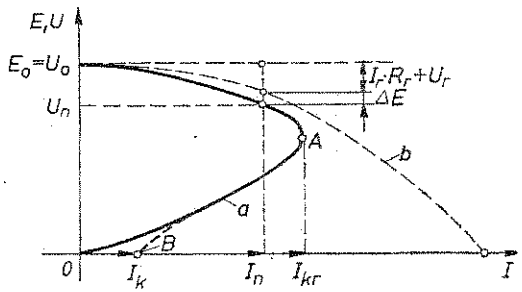
Kakve su radne osobine ovih generatora, vidjećemo snimanjem karakteristika.

Karakteristika praznog hoda. Kod ovog generatora karakteristika praznog hoda praktički je ista kao kod generatora s nezavisnom pobudom, pa je zbog toga nećemo ni snimati. Ukoliko bismo je željeli snimiti, on bi u tom slučaju morao da radi kao generator sa nezavisnom pobudom.

Vanjska karakteristika. Kod generatora sa paralelnom pobudom vanjska karakteristika snima se na isti način kao kod generatora sa nezavisnom (stranom) pobudom. Upoređujući, ustanovljavamo da kod generatora sa paralelnom pobudom struja pobude nema stalnu vrijednost. Uzrok tome je što ona zavisi od napona rotora čija vrijednost opada sa povećanjem opterećenja. Do sada smo vidjeli da kod generatora sa nezavisnom pobudom napon na krajevima opada uslijed magnetske reakcije rotora i aktivnog pada napona.

Kod generatora sa paralelnom pobudom struja pobude je manja nego odgovarajuća struja generatora sa nezavisnom pobudom, uslijed čega se krivulja napona (*a*) nalazi ispod krivulje (*b*) generatora sa nezavisnom pobudom, kako je to prikazano na sl. 3.37.

Postavlja se pitanje zašto struja pobude I_p, odnosno indukovani napon E opada kod generatora sa paralelnom pobudom. To objašnjavamo time što povećanjem opterećenja napon opada za već poznate padove napona, a time se smanjuje struja pobude. Ovo smanjenje struje pobude I_p izaziva opadanje magnetskog toka Φ, a time i indukovanog napona generatora ($E=f(\Phi)$). Znači, pored aktivnog pada napona na unutrašnjem otporu kola rotora i pada napona uslijed magnetne reakcije rotora, imamo još jedan pad napona uslijed smanjenja pobudne struje ΔE. Dakle, ukupni pad napona kod generatora sa paralelnom pobudom sastoji se iz tri dijela i iznosi:



Sl. 3.37. Vanjska karakteristika generatora sa paralelnom pobudom

$$\Delta U=I_rR_r+U_r+\Delta E \qquad \ldots\ldots \quad (3.33)$$

Pri nominalnom opterećenju ukupni pad napona iznosi $10\div20\%U_n$.
Iz tog izlazi da će napon na krajevima generatora biti:

$$U=E_0-\Delta U \qquad \ldots\ldots \quad (3.34)$$

Pri takvom opterećenju vanjskog kola kod koga nastupa struja I_{kr} kritične vrijednosti a koja obično iznosi oko $2I_n$, krivulja se može naglo okrenuti. Nastaće granica kod koje će vrijednost napona biti toliko mala da neće biti u stanju protjerati struju u mrežu. To će nastati onda kada vrijednost otpora mreže padne na nulu i tada kažemo da je nastao kratki spoj mašine. U tom slučaju napon na krajevima generatora jednak je nuli, što znači da je i pobudna struja jednaka nuli. Ostaće samo indukovani napon stvoren od zaostalog magnetizma koji tjera struju kratkog spoja I_k čija vrijednost je mala i iznosi od 0,4 do $0{,}8I_n$.

Iz ovoga vidimo da kratki spoj generatora sa paralelnom pobudom neće uzrokovati veliku struju, nego će ona nakon neke kritične granice pasti na vrlo malu vrijednost. Međutim, kratki spoj može za namotaje mašine biti vrlo opasan i u

tom vrlo kratkom vremenu prije smanjenja jačine struje. Zato se ovaj generator upotrebljava samo u onom dijelu karakteristike u kojem je napon još gotovo stalne vrijednosti.

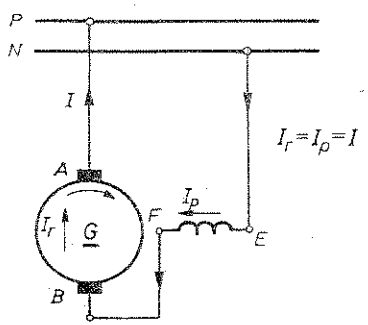
Napon će nešto brže padati nego kod generatora sa nezavisnom pobudom ali praktično i ovaj generator radi sa približno stalnim naponom. Prednost je u tome što mu ne treba poseban izvor struje za pobudu magnetskih polova.

3.3.6. **Generator sa serijskom pobudom**

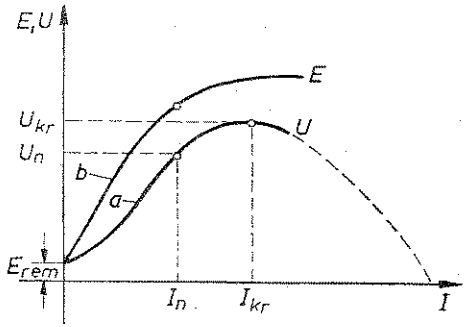
Kod ovih generatora pobudni namotaj spojen je u seriju ili u red sa namotajem rotora, kako je prikazano na sl. 3.38. Zato je proizvedena struja u namotaju rotora I_r uvijek jednaka struji opterećenja I, odnosno struji pobude I_p ($I_r = I = I_p$). S obzirom da će struja pobude imati veliku vrijednost, razumljivo je da se za stvaranje potrebnog magnetskog polja pobudni namotaj izvodi sa malim brojem navoja ali velikim presjekom provodnika.

Karakteristika praznog hoda

Serijski generator normalno nema karakteristiku praznog hoda. Pošto su namotaji rotora i magnetskih polova spojeni u seriju, neopterećenim generatorom neće teći struja iz rotora, a prema tome, neće biti struje ni u pobudnom namotaju. Da bi dobili uporedbu, odnosno konstrukciju ostalih karakteristika, može se pobudni namotaj spojiti na neki strani izvor i tako snimiti karakteristika praznog hoda na sl. 3.39, prikazana krivuljom (*b*). Kako se vidi, ona je ista kao kod generatora sa nezavisnom pobudom.



Sl. 3.38. Shema generatora sa serijskom pobudom



Sl. 3.39. Vanjska karakteristika generatora sa serijskom pobudom

Vanjska karakteristika

Vanjska karakteristika generatora sa serijskom pobudom $U = f(I)$, pri stalnoj brzini okretanja $n = \text{const.}$, na sl. 3.39. predstavljena je krivuljom (*a*). Razlika između ordinata krivulje praznog hoda (*b*) i vanjske krivulje (*a*) pri nekom opterećenju I predstavlja ukupnu promjenu napona ΔU. Ona se sastoji od aktivnog pada napona u namotaju rotora i namotaju magnetskih polova $I(R_r + R_p)$ i pada napona nastalog usljed magnetske reakcije rotora U_r. Dakle:

$$\Delta U = I(R_r + R_p) + U_r \qquad \ldots\ldots (3.35)$$

Napon na krajevima generatora biće:

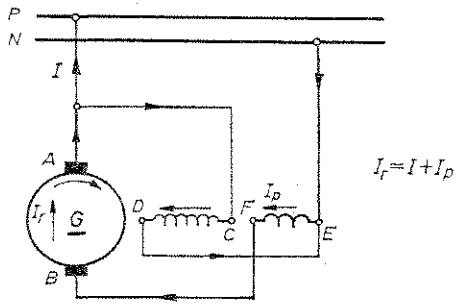
$$U = E_0 - \Delta U \qquad \ldots\ldots (3.36)$$

Pri praznom hodu generatora indukovani napon ima vrlo malu vrijednost ($E_0 = E_{rem}$) nastalu od zaostalog magnetizma. Opteretimo li generator, u početku sa porastom struje opterećenja gotovo srazmjerno se povećava i njegov napon, jer mu je magnetsko kolo nezasićeno. Međutim, daljim povećanjem struje opterećenja napon će se sporije povećavati (jer se povećava i zasićenje željeza), dok u jednom momentu pri nekoj kritičnoj struji I_{kr} ne dostigne svoju najveću vrijednost. Ako i dalje nastavimo povećavati opterećenje, napon generatora usljed povećanog pada napona će opadati dok ne dođe na nulu, što je na dijagramu prikazano isprekidanom linijom. To je, u stvari, kratki spoj generatora sa serijskom pobudom, mašina je preopterećena i može doći do njenog uništenja. Iz dijagrama se vidi da se napon sa promjenom opterećenja mijenja u širokim granicama, i nije teško zaključiti da ovaj generator nećemo upotrebljavati tamo gdje trebamo približno stalan napon. Zbog toga ovaj generator ima vrlo ograničenu upotrebu, a primjenjuje se samo u nekim specijalnim slučajevima.

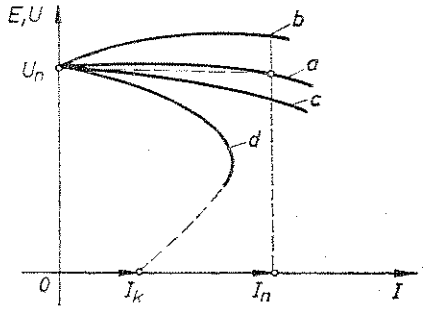
3.3.7. **Generator sa složenom pobudom**

Ovi generatori imaju na magnetskim polovima dva posebna pobudna namotaja. Jedan namotaj je *paralelni (glavni)*, a drugi *serijski (pomoćni)*, kako je prikazano na sl. 3.40.

Upravo zbog toga što se kod ovih generatora nalaze i paralelni i serijski namotaj, u njima dolaze do izražaja združene osobine obje vrste. Naime, dok u generatoru zbog paralelnog namotaja napon na njegovim krajevima opada s povećanjem opterećenja, serijski namotaj, zbog toga što kroz njega protiče cjelokupna struja opterećenja, povećava magnetski tok Φ u generatoru i time automatski djelomično ili potpuno sprečava opadanje napona. Inače, da li će serijski namotaj kod porasta



Sl. 3.40. Shema generatora sa složenom (kompaund) pobudom



Sl. 3.41. Vanjska karakteristika generatora sa složenom (kompaund) pobudom

opterećenja samo djelomično ili totalno spriječiti opadanje napona, ili će ipak napon zbog djelovanja serijskog namotaja još porasti, ovisi o broju navoja serijskog namotaja. Pri tome mogu nastati određene mogućnosti izvedbe serijskog namotaja.

— Serijski namotaj ima toliki broj navoja da je njegova pobuda upravo tolika da pokriva padove napona i tako napon složenog generatora ostane približno stalan i kod najrazličitijih opterećenja od praznog hoda do nekog iznosa tereta. Vanjska karakteristika (kriva *a*) prikazana je na sl. 3.41. Kako se sa dijagrama vidi, napon se praktično mijenja u granicama od $2 \div 3\% U_n$. Takav režim rada generatora nazivamo *kompaundirani* i kod njega ne treba nikakva regulacija napona.

— Ukoliko se zahtijeva da napon na krajevima generatora ostane približno stalan pri svim opterećenjima do nominalnog, onda je potrebno povećati broj navoja serijskog pobudnog namotaja tako da njegov magnetni napon pokriva još i padove napona u provodnicima kojima se odvodi energija do udaljenih trošila. Takav oblik vanjske karakteristike prikazan je na sl. 3.41. krivom (*b*), a za generator kažemo da je *nadkompaundirani*.

— *Podkompaundirani* generator nastaje onda kada serijska pobuda samo djelomično kompenzira padove napona. Njegova vanjska karakteristika (sl. 3.41) ima oblik krive (*c*) koja pokazuje blago padanje napona s povećanjem opterećenja.

— Kod *protukompaundiranog* generatora, čija je serijska pobuda suprotna paralelnoj (na sl. 3.40. krajeve serijskog pobudnog namotaja treba zamijeniti u *EF*), napon naglo pada, kako je prikazano na sl. 3.41. kriva (*d*). To objašnjavamo time što magnetni napon serijskog pobudnog namotaja djeluje suprotno u odnosu na magnetni napon paralelnog namotaja. Primjenjuje se u specijalnim slučajevima, npr. kod generatora za zavarivanje, reflektorskih uređaja itd., gdje se zahtijeva vremensko ograničenje trajanja struje kratkog spoja I_k.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta znači pobuditi generator istosmjerne struje?
2. Na osnovu čega vršimo podjelu generatora istosmjerne struje?
3. Nacrtaj shemu generatora sa nezavisnom pobudom i njegovu vanjsku karakteristiku sa obrazloženjem!
4. Nacrtaj shemu generatora sa paralelnom pobudom i njegovu vanjsku karakteristiku sa objašnjenjem!
5. Nacrtaj shemu generatora sa serijskom pobudom i njegovu vanjsku karakteristiku sa objašnjenjem!
6. Kakvu ulogu ima serijski namotaj kod generatora sa složenom pobudom?

3.4. VRSTE I OSOBINE MOTORA ISTOSMJERNE STRUJE

3.4.1. Vrste motora istosmjerne struje

Već ranije smo utvrdili da između motora i generatora istosmjerne struje nema nikakve razlike u konstruktivnoj izvedbi. To znači da se oni ne razlikuju ni po načinu međusobnog spajanja pobudnog namotaja sa namotajem rotora.

Prema tome, motore istosmjerne struje isto kao i generatore dijelimo na:

— *motore sa paralelnom (poredbom, otočnom) pobudom,*

— *motore sa serijskom (rednom) pobudom* i

— *motore sa složenom (kompaund) pobudom.*

Sve tri vrste ovih motora imaju vrlo široku primjenu.

3.4.2. Osobine motora istosmjerne struje

Radne osobine pojedinih vrsta motora najbolje ćemo upoznati pomoću različitih krivulja koje pokazuju zavisnost električnih i mehaničkih veličina od nekih drugih. Te krivulje nazivamo karakteristike motora, a najvažnije su:

— *karakteristika obrtnog* ili *elektromagnetnog momenta*, koja pokazuje kako se mijenja obrtni momenat motora M pri promjeni struje rotora I_r. Pri tome napon na koji je priključen motor ima stalnu vrijednost (U=const.) i ne postoji podešavanje struje pobude. Dakle:

$$M = f(I_r) \quad \text{pri } U = \text{const.} \quad \text{i} \quad r_p = \text{const.} \qquad \ldots\ldots (3.37)$$

— *karakteristika brzine okretanja*, koja pokazuje kako se mijenja brzina okretanja rotora motora n pri promjeni struje rotora I_r. Pri tome napon pomoću koga se motor napaja ima stalnu vrijednost (U=const.) i ne postoji podešavanje pobudne struje. Dakle:

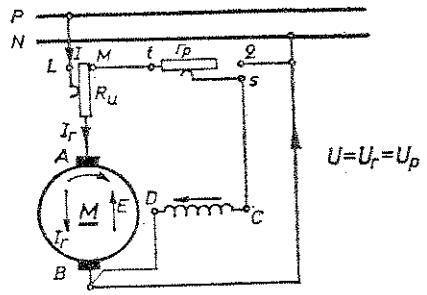
$$n = f(I_r) \quad \text{pri } U = \text{const.} \quad \text{i} \quad r_p = \text{const.} \qquad \ldots\ldots (3.38)$$

3.4.3. Motor sa paralelnom pobudom

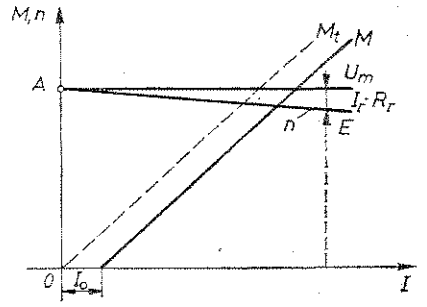
Kod ovog motora pobudni namotaj spojen je paralelno sa namotajem rotora, kako je prikazano na sl. 3.42. Između mreže i namotaja rotora spojen je otpornik R_u koji služi za puštanje motora u rad. Napon na vanjskim krajevima U istovremeno je napon koji vlada na krajevima rotorskog i pobudnog namotaja ($U = U_r = U_p$).

Karakteristika obrtnog momenta

Odranije nam je poznat izraz za obrtni momenat (3.7) $M = k_1 \Phi I$. Magnetski tok Φ zavisi od struje pobude I_p i preko nje od dovedenog napona mreže. Pošto



Sl. 3.42. Shema motora sa paralelnom pobudom



Sl. 3.43. Karakteristike obrtnog momenta i brzine okretanja motora sa paralelnom pobudom

napon mreže ima približno stalnu vrijednost, to je i pobudna struja I_p stalna ($I_p = U/R_p$), a time i magnetni tok Φ, jer je $\Phi = f(I_p)$, pa je:

$$M = kk_1 I, \text{ odnosno } M = k_2 I \qquad \ldots\ldots (3.39)$$

Iz formule zaključujemo da kod motora sa paralelnom pobudom obrtni momenat linearno raste sa strujom opterećenja, kako je prikazano na sl. 3.43. Isprekidanom linijom predstavljen je teoretski obrtni momenat M_t. Stvarni obrtni momenat pomjeren je na apscisnoj osi za vrijednost struje praznog hoda I_0 i dat je punom linijom označenom sa M.

Karakteristika brzine okretanja

I ovdje ćemo se koristiti već poznatim izrazima (3.12. i 3.13) za brzinu okretanja motora n:

$$n = \frac{U_m - I_r R_r}{k_2 \Phi}, \text{ odnosno } n = \frac{1}{k_2} \frac{E}{\Phi}.$$

Pošto smo već utvrdili da je magnetski tok Φ stalne vrijednosti, iz prethodnih izraza nije teško zaključiti da će se pri promjeni struje opterećenja I brzina okretanja motora mijenjati onako kako se mijenja protunapon E. Iz jednačine za protunapon $E = U_m - I_r R_r$ odmah uočavamo da se protunapon E razlikuje od dovedenog napona U_m za pad napona u rotoru $I_r R_r$.

Kada je motor neopterećen, protunapon E jednak je dovedenom naponu U_m ($E = U_m$) i to je predstavljeno početnom tačkom A na dijagramu. Horizontalna linija predstavlja napon U_m pri praznom hodu motora. Pri opterećenju raste struja rotora I_r, a time i pad napona u rotoru $I_r R_r$ uslijed čega se smanjuje vrijednost protunapona E. Kako brzina okretanja motora n zavisi direktno od promjene protunapona E, krivulja za protunapon je ujedno i krivulja brzine okretanja motora n samo u drugom mjerilu.

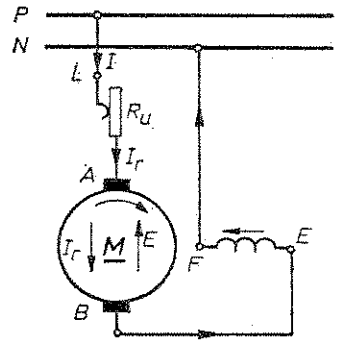
Budući da je vrijednost pada napona u rotoru (mala vrijednost otpora namotaja rotora) malena, možemo slobodno kazati da paralelni motori imaju gotovo stalnu brzinu okretanja, bez obzira na promjenu opterećenja. Ovakav tip karakteristike nazivamo „tvrdom". Upotrebljavaju se za pogon raznih alatnih mašina, centrifugalnih sisaljki, štamparskih mašina, mašina za izradu papira itd.

Regulaciju brzine okretanja paralelnog motora vršimo na taj način što regulišemo struju pobude I_p, a time i magnetni tok Φ i tako držimo brzinu okretanja n stalnom pri raznim opterećenjima. Regulaciju struje pobude vršimo tako da u kolo pobudnog namotaja stavljamo promjenljivi otpornik r_p, kako je to prikazano na sl. 3.42.

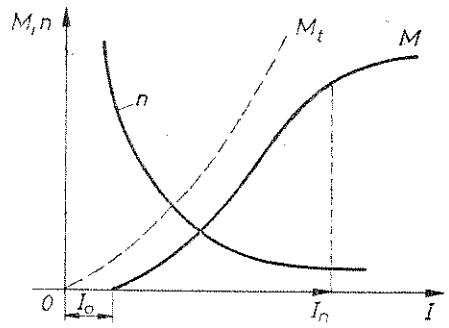
Grade se za napone do 1 500 V čija snaga ide i do nekoliko hiljada kW.

3.4.4. **Motor sa serijskom pobudom**

Kod ovog motora pobudni namotaj spojen je u seriju sa namotajem rotora, kako je prikazano na sl. 3.44. Između mreže i namotaja rotora spojen je otpornik R_u koji služi za puštanje motora u rad. Pošto su namotaji povezani serijski, kroz njih će teći ista struja, čija vrijednost zavisi od struje opterećenja motora ($I = I_r = I_p$).



Sl. 3.44. Shema motora sa serijskom pobudom



Sl. 3.45. Karakteristike obrtnog momenta i brzine okretanja motora sa serijskom pobudom

Karakteristika obrtnog momenta

Iz formule za obrtni momenat $M = k_1 \Phi I$ lako možemo zaključiti da će obrtni momenat kod serijskog motora biti srazmjeran kvadratu jačine struje u rotoru. Magnetski tok Φ stvoren je od struje pobude koja je zbog serijskog spoja namotaja jednaka struji rotora, odnosno struji opterećenja. Pošto je u pitanju feromagnetni materijal, to je $\Phi = f(I)$, pa je:

$$M = kf(I)\, I.$$

Za neku određenu struju opterećenja biće:

$$\Phi = k_1 I.$$

Konstanta k_1 je promjenljiva za svaku vrijednost struje opterećenja pa imamo:

$$M = k_2 I^2 \qquad \ldots\ldots (3.40)$$

Iz formule zaključujemo da kod motora sa serijskom pobudom obrtni momenat raste sa kvadratom struje opterećenja, kako je prikazano na sl. 3.45. Isprekidanom linijom predstavljen je teoretski obrtni momenat M_t. Stvarni obrtni momenat mora biti pomjeren od početka koordinatnog sistema za vrijednost struje praznog hoda I_0 i dat je punom linijom označenom sa M.

Karakteristika brzine okretanja

Povećanjem opterećenja raste i struja a sa njome i magnetni tok Φ pošto je serijska veza. Iz formule za brzinu okretanja motora

$$n = \frac{1}{k_2} \frac{E}{\Phi}$$

vidimo da se magnetski tok Φ nalazi u nazivniku, pa je vidljivo da će se povećanjem opterećenja motora brzina okretanja naglo smanjivati.

Kod porasta opterećenja smanjivaće se i protunapon E zbog rasta pada napona $I_r R_r$ a to vidimo iz poznatog izraza $E = U_m - I_r R_r$. Pošto brzina okretanja direktno zavisi od protunapona E, to njegovim smanjenjem isti pada. To je još jedan od uzroka zbog čega brzina okretanja pada prilikom povećanja opterećenja. Krivulja brzine okretanja u zavisnosti od opterećenja biće, dakle hiperbolična krivulja naglog pada (sl. 3.45). Ovakvu karakteristiku motora gdje se brzina okretanja n mijenja u širokim granicama nazivamo „mekom".

Da zaključimo: kod serijskog motora povećanjem opterećenja obrtni momenat raste sa kvadratom struje opterećenja dok brzina okretanja naglo pada.

Ova jedinstvena osobina serijskog motora našla je veliku primjenu u električnoj vuči (električne lokomotive, tramvaji, trolejbusi i dr.) i u svim elektromotornim pogonima gdje se zahtijeva veliki pokretni momenat kao npr. kod velikih teretnih dizalica.

Pri nominalnoj struji opterećenja I_n imamo veliki obrtni momenat (vučnu snagu), a malu brzinu okretanja, što je naročito važno pri polasku tramvaja ili pokretnom momentu kod dizalice (sl. 3.45).

Pri radu motora bez opterećenja (prazan hod) ili sa malim opterećenjima struja koju troši motor, a isto tako i stvoreni magnetni tok Φ imaju vrlo malu vrijednost. Međutim, i pored toga rad motora postaje nestabilan, brzina okretanja naglo raste i pri rasterećenju motora mogla bi da naraste na vrlo veliku vrijednost, nedozvoljenu sa gledišta njegove mehaničke otpornosti. Može doći do mehaničkog oštećenja mašine, pa čak i do raspadanja rotora, ispadanja rotora iz ležišta itd. Zbog toga se serijski motori ne smiju primjenjivati za pokretanje radnih mašina koje rade u u režimu praznog hoda i pri malim opterećenjima, kao što su transporteri, razne alatne mašine itd.

Treba zapamtiti! Serijski motor ni u kom slučaju ne smijemo pustiti u rad bez opterećenja ili sa malim opterećenjem (najmanje dozvoljeno opterećenje iznosi 0,2 do 0,3 od nominalnog). Iz istog razloga snaga serijskog motora ne smije se prenositi preko remenica, jer može doći do njenog spadanja i tada motor ostaje rasterećen. Ova mana ili, bolje kazano, opasnost, otklanja se direktnom i sigurnom vezom osovine motora i osovine npr. tramvajskih točkova, tako da je onemogućen rad serijskog motora u praznom hodu.

Serijski motori grade se do nekoliko hiljada kW snage, napona do 3 000 V i brzine okretanja od 400 do 3 000 °/min, a u nekim specijalnim slučajevima imaju i veću brzinu okretanja.

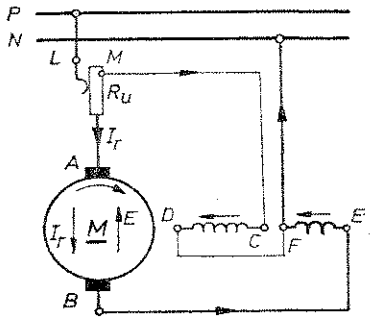
3.4.5. **Motor sa složenom pobudom**

Ovaj motor ima dva pobudna namotaja: jedan koji je spojen u seriju i drugi koji je spojen paralelno sa namotajem rotora, kako je prikazano na sl. 3.46. Između mreže i namotaja rotora spojen je otpornik R_u koji služi za puštanje motora u rad.

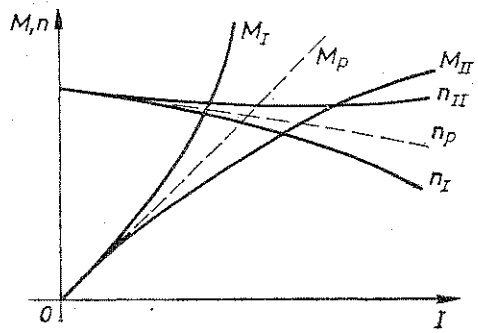
Kod složenog motora *glavni pobudni namotaj je paralelni*. Na sl. 3.47. prikazane su karakteristike obrtnog momenta M_p i brzine okretanja n_p motora sa paralelnom pobudom. *Drugi pobudni namotaj je serijski (pomoćni)* i vrši promjenu dejstva paralelnog namotaja.

Prema tome, postoje dvije podvrste složenog motora i to:

— aditivni sa serijskim pobudnim namotajem uključenim tako da se njegov magnetni tok Φ sabira sa magnetnim tokom paralelnog namotaja. Kod ove podvrste složenog motora obrtni momenat M_I biće veći od obrtnog momenta koji bi motor imao samo pod dejstvom paralelnog namotaja. Brzina okretanja n_I biće manja nego pri dejstvu samo paralelnog namotaja, odnosno promjena brzine okretanja biće manja nego kod serijskog motora (sl. 3.47);



Sl. 3.46. Shema motora sa složenom pobudom



Sl. 3.47. Karakteristike obrtnog momenta i brzine okretanja motora sa složenom pobudom

— diferencijalni sa serijskim pobudnim namotajem uključenim tako da njegova pobuda bude suprotna paralelnoj (na sl. 3.46. krajeve serijskog pobudnog namotaja treba zamijeniti u EF), tj, njegov magnetni tok usmjeren je protiv magnetnog toka paralelnog namotaja. Na sl. 3.47. prikazane su karakteristike ove podvrste složenog motora koje nam pokazuju da je obrtni momenat M_{II} manji, a brzina okretanja n_{II} veća nego da postoji samo dejstvo paralelnog motora. Ova druga podvrsta složenog motora rijetko se primjenjuje, dok se prva podvrsta primjenjuje u elektromotornim pogonima gdje je potrebno da motor pri većim opterećenjima ima veći obrtni momenat, a manju brzinu okretanja nego paralelni motor, a ipak, ne tako veliku promjenu brzine okretanja kao serijski motor.

Nekada se od složenog motora traži da snažno povuče samo u momentu puštanja u rad (veliki pokretni momenat), a da kasnije radi sa približno stalnom brzinom okretanja, tada se serijski pobudni namotaj uključi samo za vrijeme pokretanja, a kasnije se (kada motor postigne punu brzinu okretanja) iskopča.

Zbog navedenih osobina složeni motori su najpogodniji za pogon radnih mašina sa zamajcem i uopšte su pogodni za pogon teških alatnih mašina — makaza, presa, trolejbusa itd.

3.4.6. **Puštanje (pokretanje) motora istosmjerne struje u rad**

Pod puštanjem motora u rad podrazumijevamo proces prevođenja motora iz stanja mirovanja u aktivno radno stanje. Pri polasku motora, tj. u momentu njegovog priključenja na mrežu, rotor motora trenutno još miruje, te je u tom momentu protunapon jednak nuli ($E=0$). Vrijednost struje pokretanja I_{pol} u tom

momentu ovisi samo o dovedenom naponu U_m i o aktivnom otporu namotaja rotora R_r (ukoliko se radi o serijskom motoru, onda dolazi u obzir još i aktivni otpor pobudnog namotaja R_p). Dakle:

$$I_{pol}=\frac{U_m}{R_r} \qquad \ldots\ldots (3.41)$$

Pošto otpor namotaja rotora mora biti što manji, jasno je da će vrijednost struje koju motor povuče iz mreže u momentu uključenja biti vrlo velika. To ćemo najbolje vidjeti na sljedećem primjeru:

Motor snage $P=4$ kW priključen je na mrežu istosmjerne struje napona $U=220$ V i struje $I_n=20$ A (nominalna struja opterećenja). Aktivni otpor namotaja rotora je $R_r=0{,}5\ \Omega$. Kolika će biti vrijednost struje u momentu puštanja motora u rad ako bi na njegove krajeve bio doveden puni napon mreže?

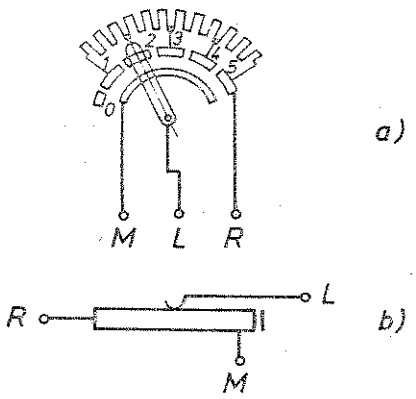
Rješenje:

$$I_{pol}=\frac{U_m}{R_r}=\frac{220}{0{,}5}=440\text{ A}.$$

Kako se vidi iz primjera, struja bi u momentu pokretanja motora bila 22 puta veća od njegove nominalne struje I_n.

Struja uključenja ovako velike vrijednosti izazvala bi strujni udar u instalaciji i u mreži, te bi moglo doći do oštećenja vodova. Osim toga, utiče na trenutačni veliki pad napona u mreži i izaziva pregorijevanje osigurača, iskapčanje automatske sklopke, i tako dolazi do prekida struje. No, postoji opasnost da rotor bude oštećen tako što će namotaj rotora pregorjeti (kod serijskih motora i pobudni namotaj) ili što će se na kolektoru javiti iskrenje. Na kraju pokretni momenat zbog velike udarne struje dobija veliku vrijednost $M_{po}=k I_{pol}\Phi$, te rotor polazi sa velikim zamahom tako da može doći do velikog kvara.

Prema tome, direktno uključivanje motora na pun napon mreže u pravilu nije dozvoljeno, izuzev malih motora snage od 0,5 do 1 kW.



Sl. 3.48. Upuštač (pokretač) motora istosmjerne struje: a) shematski prikaz, b) simbol.

Da bismo izbjegli svu ovu opasnost, tj. da bismo pri pokretanju motora spriječili nastanak struje vrlo visoke vrijednosti, moramo za vrijeme pokretanja povećati ukupnu vrijednost aktivnog otpora rotora. To činimo na taj način da u seriju sa namotajem rotora spojimo dodatni dovoljno veliki stepenasto promjenljivi otpornik. Takav otpornik naziva se *zaštitni otpornik* ili *otpornik za puštanje motora u rad (upuštač, pokretač)* koji je predstavljen na sl. 3.48 Sastoji se od četiri stepena otpornika, čiji su završeci izvedeni na pet metalnih kontakata 1, 2, 3, 4 i 5. Za spajanje sa pobudnim namotajem služi zajednički metalni luk L. Ručica pokretača mora imati dva klizna kontakta od kojih jedan klizi po kontaktima 1, 2. . .5, a drugi istovremeno po luku L. Prije puštanja u rad ručica pokretača mora se nalaziti na praznom kontaktu 0.

Ovaj otpornik za motore sa paralelnom i složenom pobudom ima tri priključne stezaljke koje su označene slovima L, R i M. Kraj L spaja se sa jednim provodnikom voda, odnosno mrežom („linije" otud znak L), kraj R spaja se sa jednim polom rotora („rotora" otud znak R), priključna stezaljka M („magnet" otud znak M) služi za granu pobudne struje i spaja se sa ulazom C u paralelni namotaj statora. Otpornik za serijski motor je isti, s tim što nema priključnu stezaljku M.

Svaki upuštač mora biti demenzionisan za određene uslove rada. Obično se dimenzioniše tako da se pomoću njega može izvršiti određeni broj uključivanja u vremenu od jednog sata, a da on pri tome uslijed zagrijavanja ne bude oštećen.

Vrijednost otpora upuštača određujemo tako da struja kroz namotaje rotora i upuštača pri puštanju motora u rad ne bude veća od 1,5 do 2 puta od nominalne struje koja protiče kroz rotor motora pri njegovom punom opterećenju. Dakle:

$$I_{pol}=\frac{U_m}{R_r+R_u} \qquad \ldots\ldots (3.42)$$

Pri puštanju motora u rad vrijednost otpora upuštača mora biti najveća. Ako uzmemo da je struja puštanja 1,5 puta veća od nominalne, dobićemo za naš primjer da je vrijednost otpora upuštača

$$R_u=\frac{U_m}{1{,}5\,I_n}-R_r=\frac{220}{1{,}5\cdot 20}-0{,}5=7{,}33-0{,}5$$

$$R_u=6{,}83\ \Omega.$$

Čim se rotor motora pokrene, doći će do stvaranja protunapona, a njegova vrijednost će se povećavati što više raste brzina okretanja motora. Kada motor dostigne nominalnu brzinu okretanja, formula za izračunavanje struje rotora biće:

$$I_r=\frac{U_m-E}{R_r+R_u} \qquad \ldots\ldots (3.43)$$

Iz formule vidimo da bi otpor za pokretanje sada isuviše smanjivao jačinu struje, a time i obrtni momenat ($M=k_1\Phi I$). S druge strane, došlo bi do nepotrebnog gubitka električne energije $R_u I^2$, te je povećanjem protunapona potrebno obavezno smanjiti vrijednost otpora pokretača R_u. Kada motor dostigne normalnu brzinu okretanja, cijelu vrijednost otpora pokretača treba isključiti, jer je protunapon dostigao puni iznos koji je gotovo jednak naponu.

Postupak puštanja motora u rad. Na sl. 3.49. prikazan je način spajanja otpornika (upuštača, pokretača) za puštanje u rad paralelnog motora.

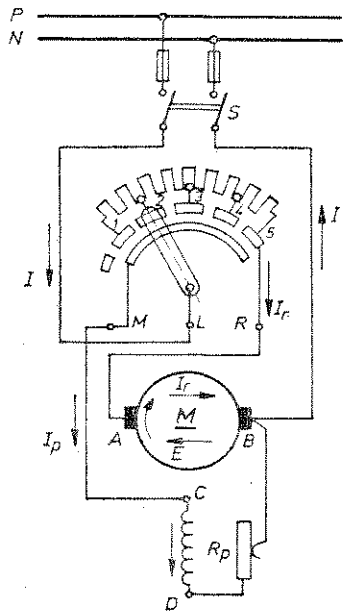
Pri puštanju motora u rad najprije se zatvori sklopka S. U pobudnom namotaju poteče struja I_p koja stvara magnetni tok Φ. Neopohdno je da za vrijeme pokretanja struja I_p i magnetni tok Φ imaju stalnu vrijednost.

Premještanjem ručice pokretača na prvi radni kontakt (stepen) 1, maksimalna vrijednost struje pokretanja biće:

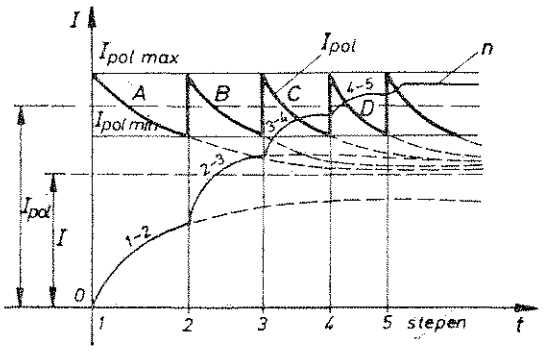
$$I_{pol\,max}=\frac{U_m}{R_r+\Sigma R_u} \qquad \ldots\ldots (3.44)$$

gdje je ΣR_u zbir otpora sva četiri stepena otpornika (upuštača). Već smo kazali da se vrijednost otpora upuštača ΣR_u odabire tako da je $I_{pol\,max}\leq 2I_n$. U skladu

sa strujom $I_{pol\,max}$ motor razvija momenat pokretanja $M_{po}=kI_{pol\,max}\Phi$. Ako je ovaj momenat veći od momenta opterećenja, onda motor kreće nekim ubrzanjem i stvara protunapon E proporcionalan sa brzinom okretanja n, kako je prikazano na sl. 3.50, krivulja 1—2. U vezi s tim, prema krivulji A smanjuje se struja pokretanja



Sl. 3.49. Shema spajanja upuštača (pokretača) za paralelni motor



Sl. 3.50. Dijagram promjene struje pokretanja I_{pol} i brzine okretanja n pri procesu puštanja paralelnog motora u rad

i proporcionalno s njom i momenat pokretanja. Otpor upuštača proračuna se tako da se pri postepenom isključivanju stepena struja pokretanja mijenja u granicama vrijednosti od $I_{pol\,max}$ do $I_{pol\,min}$. U tom slučaju pod strujom pokretanja podrazumijevamo struju:

$$I_{pol}=\frac{I_{pol\,max}+I_{pol\,min}}{2} \qquad \ldots\ldots (3.45)$$

Pošto se struja pokretanja smanji na vrijednost $I_{pol\,min}$, ručicu pokretača dovodimo na kontakt 2, isključujući na taj način otpor prvog stepena pokretača. Struja pokretanja ponovo se povećava do vrijednosti $I_{pol\,max}$, nakon čega brzina okretanja motora raste po krivulji 2—3, a struja i momenat opadaju po krivulji B. Sljedeće operacije pokretanja obavljaju se kao i prethodne dok ne bude isključen cijeli otpornik, nakon čega motor počinje raditi pri određenim vrijednostima struje I i brzine okretanja n.

Ukoliko bismo ručicu pokretača ostavili duže na nekom kontaktu, onda bi se promjena struje i brzina okretanja odvijale po isprekidanim linijama koje čine produžetak odgovarajućih punih linija, kako se vidi na sl. 3.50.

Da bismo osigurali iskopčavanje motora sa mreže, potrebno je električki spojiti kontakt 1 sa lukom L tako da se stvori zatvoreno električno kolo u kome su međusobno serijski spojeni pobudni namotaj, upuštač, namotaj rotora i regulacioni otpornik r_p.

Pri iskopčavanju motora sa mreže, ručicu pokretača stavljamo na prazni kontakt, a potom otvaramo sklopku S.

Zapamti: otpor pokretača treba uvijek postepeno isključivati, stepen po stepen, dok motor ne dobije normalnu brzinu okretanja. Pri tome treba paziti da ručica pokretača ne ostane duže vremena u nekom međupoložaju, jer bi otpornici koji su proračunati za kratkotrajan rad mogli pregorjeti.

Uglavnom se pokretanje izvodi ručno, dok se u posljednje vrijeme vrlo često primjenjuje poluatomatsko i automatsko pokretanje motora.

Za vježbu: nacrtaj shemu serijskog i složenog motora sa otpornikom (upuštačem). Upuštač predstavi simbolom koji je dat na sl. 3.48b.

Puštanje serijskog motora u osnovi je isto kao i puštanje paralelnog, s tom razlikom što serijski motor ni u kom slučaju ne smijemo pokretati u praznom hodu. Ono proizlazi iz već poznatog svojstva njegove brzinske karakteristike $n=f(I_r)$

3.4.7. **Regulacija brzine okretanja motora istosmjerne struje**

Regulisanje brzine okretanja motora istosmjerne struje u mnogim motornim pogonima je veoma važno. Iz dosadašnjeg izlaganja o motorima mogli smo zaključiti da se brzina okretanja motora sama od sebe ustali kod datih stalnih pogonskih prilika. Međutim, u praksi se često javlja potreba da se nekom motoru promijeni brzina okretanja i kod stalnog opterećenja.

Prema već poznatom izrazu (3.12)

$$n=\frac{U_m-I_rR_r}{k_2\Phi}$$

vidimo da brzina okretanja motora zavisi od dovedenog napona U, otpora rotora R_r i magnetnog toka Φ. Iz toga slijedi da regulaciju brzine okretanja možemo principijelno postići na dva načina:

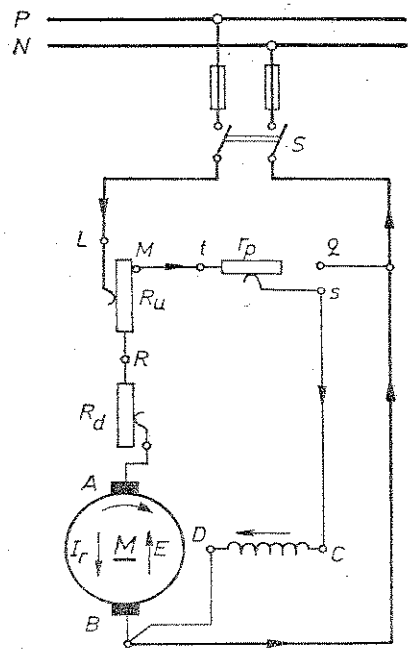
— *promjenom dovedenog napona* i
— *promjenom magnetnog toka* Φ.

Regulacija brzine okretanja promjenom napona mreže. Kada bi nam na raspolaganju stajalo više napona različitih vrijednosti na koje bi nekim jednostavnim načinom mogli priključiti motor, onda bi regulisanje brzine okretanja bilo vrlo jednostavno i vršilo bi se ekonomično bez većih gubitaka. U tom slučaju bi trebalo samo odabrati napon adekvatan željenoj brzini okretanja n.

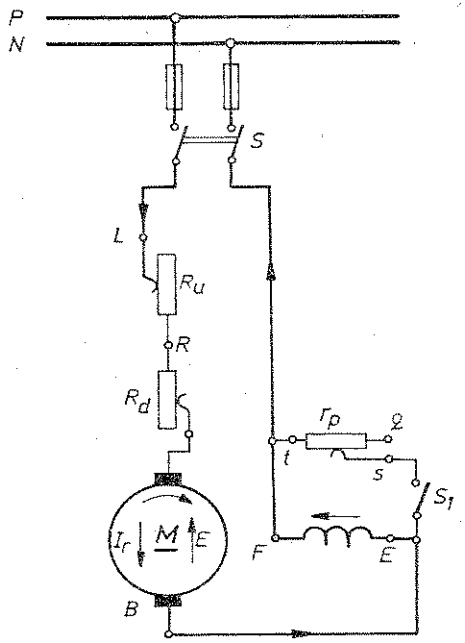
Međutim, u većini slučajeva vanjska mreža na koju se priključuje motor ima stalni napon U, pa regulacija brzine okretanja promjenom napona nije moguća.

Ipak, u posebnim slučajevima, kod izdvojenih pogona koji imaju vlastitu mrežu istosmjerne struje i specijalne uređaje za dobivanje napona različitih vrijednosti može se brzina okretanja regulisati promjenom napona. U novije vrijeme korištenjem tiristora omogućena je izvedba upravljačkih ispravljača pomoću kojih možemo ekonomično mijenjati izlazni napon na koji priključujemo motor, pa se tako reguliše njegova brzina okretanja.

Regulacija brzine okretanja promjenom napona mreže moguća je i promjenom otpora rotora R_r. Njegova vrijednost se ne može smanjivati, ali se može povećavati dodavanjem promjenljivog otpornika R_d u kolo namotaja rotora. Na slikama 3.51. i 3.52. prikazana je shema spoja paralelnog i serijskog motora sa dodatnim regulacionim otpornikom. Taj otpornik je sličan onome koji je upotrijebljen



Sl. 3.51. Shema spoja regulacionih otpornika za promjenu napona i magnetnog toka kod paralelnog motora



Sl. 3.52. Shema spoja regulacionih otpornika za promjenu napona i magnetnog toka kod serijskog motora

kod pokretanja motora. Na tom otporniku troši se dio dovedenog napona, te će zbog toga na krajevima motora djelovati manji napon $U-I_r(R_r+R_d)$. Pošto brzina okretanja zavisi od napona, njegovim smanjenjem i ona opada. To znači da se brzina okretanja može regulisati od njezine nominalne vrijednosti pa naniže. Treba, međutim, znati da je regulacija brzine okretanja u širim granicama ovim načinom neekonomična, jer se u regulacionom otporniku električna energija pretvara u džulovu toplotu I^2R_d koja može iznositi veliki postotak ukupne snage dovedene motoru. To znači da bi stepen korisnog djelovanja takvog motora bio veoma mali. Ovakav način regulacije brzine okretanja primjenjuje se uglavnom kod motora malih snaga.

Regulacija brzine okretanja promjenom magnetnog toka. Brzina okretanja motora zavisi i od magnetnog toka Φ ($n=k_2E\cdot 1/\Phi$) i njegovom promjenom je lako regulišemo. To činimo na taj način što u kolo pobudnog namotaja uključujemo promjenljivi otpornik r_p pomoću koga možemo mijenjati struju pobude I_p, odnosno magnetni tok Φ, a time i brzinu okretanja n.

Smanjenje brzine okretanja motora povećanjem magnetnog toka Φ iznad normalne vrijednosti u praksi nema mnogo značaja, jer je motor već kod normalnog pogona gotovo zasićen magnetnim silnicama, pa bi povećanje magnetnog toka bilo vrlo malo, a time i vrlo malo smanjenje brzine okretanja.

Ako kod paralelnog motora u seriju sa pobudnim namotajem spojimo promjenljivi otpornik r_p (sl. 3.51), smanjiće se struja pobude I_p u odnosu na povećanje otpora, a sa njome i magnetni tok Φ. Pošto je brzina okretanja obrnuto proporcionalna magnetnom toku Φ, to će se sa njegovim smanjenjem brzina okretanja n povećavati. Iz ovog slijedi da se pomoću promjenljivog otpornika regulacija brzine okretanja može vršiti od normalne vrijednosti pa naviše. Ovakav način regulacije se često primjenjuje, jer kroz pobudni namotaj paralelnog motora teku vrlo male struje, pa su i gubici energije neznatni. Nedostatak ovakvog načina regulisanja brzine okretanja je u tome što smanjenjem magnetnog toka Φ slabi i obrtni momenat motora, pa njegov rad postaje nestabilan.

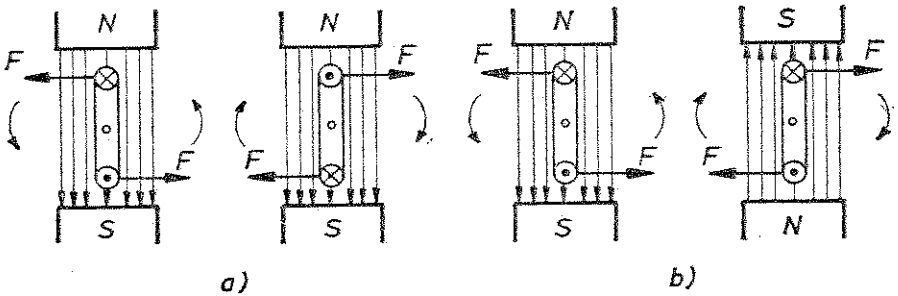
Regulaciju brzine okretanja kod serijskog motora vršimo također promjenom magnetnog toka Φ i to na taj način da se paralelno sa pobudnim namotajem spaja promjenljivi otpornik r_p (sl. 3.52).

Kod ovog motora jačinu struje pobude I_p zbog serijske veze namotaja rotora i pobudnog namotaja ne možemo povećati iznad jačine struje opterećenja. Međutim, možemo je smanjiti povećanjem vrijednosti otpora regulacionog otpornika r_p. Njenim smanjenjem smanjuje se i magnetni tok Φ, dok se brzina okretanja povećava. Iz ovog zaključujemo da i kod serijskog motora možemo samo povećavati brzinu okretanja, a ne i smanjivati u odnosu na veličinu koju motor ima pri nekom opterećenju.

Ovakav način regulacije brzine okretaja je vrlo ekonomičan i ima široku primjenu u elektrovuči.

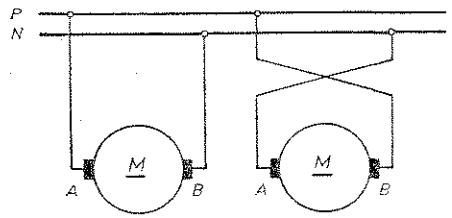
3.4.8. **Promjena smjera okretanja motora istosmjerne struje**

Kada smo govorili o načinu rada motora, utvrdili smo da su smjer elektromagnetne sile, a time i smjer okretanja motora određeni smjerom magnetnog toka Φ i smjerom struje koja protiče kroz namotaj rotora. Kako smjer magnetnog toka ovisi o smjeru struje kroz pobudni namotaj, proizlazi da se smjer okretanja motora



Sl. 3.53. Promjena smjera okretanja motora istosmjerne struje vrši se: a) promjenom smjera struje kroz namotaj rotora, b) promjenom smjera struje kroz pobudni namotaj.

istosmjerne struje mijenja ili promjenom smjera struje kroz namotaj rotora ili promjenom smjera struje kroz pobudni namotaj, kako je prikazano na sl. 3.53.



Sl. 3.54. Promjena smjera okretanja promjenom veza na priključnicama

Najčešća promjena smjera okretanja vrši se uglavnom promjenom smjera struje u rotoru, a to činimo vrlo jednostavno, promjenom veza na priključnicama (sl. 3.54).

Smjer okretanja rotora nekog motora obično se utvrđuje posmatranjem remenice ili spojke po dužini rotora. „Desnim" smjerom okretanja smatra se okretanje rotora u smjeru kretanja kazaljke na satu, a okretanje suprotno od smjera kretanja kazaljke na satu nazivamo „lijevim" smjerom.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Kako se mijenjaju obrtni momenat i brzina okretanja kod motora sa paralelnom pobudom pri promjeni opterećenja?
2. Nacrtaj karakteristike serijskog motora, daj objašnjenje i na osnovu toga odredi moguću primjenu!
3. Objasni proces puštanja motora istosmjerne struje u rad!
4. Od čega zavisi brzine okretanja motora istosmjerne struje i kako vršimo njenu regulaciju?
5. Kako vršimo promjenu smjera okretanja motora istosmjerne struje?

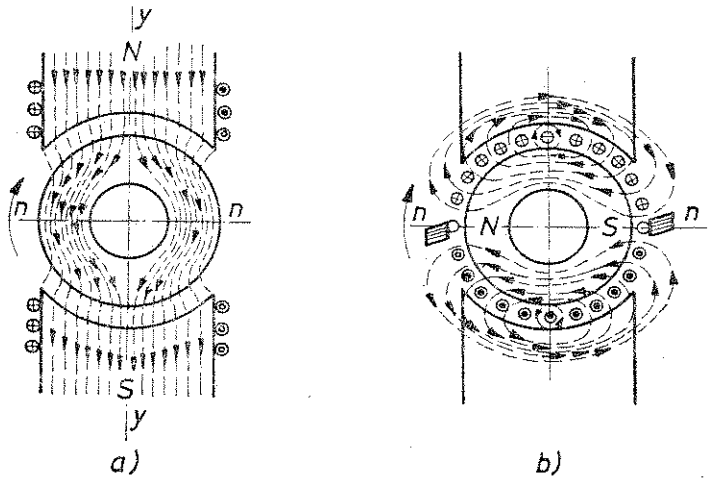
NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

3.5. RAD I POJAVE U MAŠINAMA ISTOSMJERNE STRUJE

Magnetna polja u mašinama istosmjerne struje nastaju elektromagnetnim djelovanjem električne struje (magnetni naponi) u njenim namotajima. To su *magnetno polje statora, magnetno polje rotora* (armature) i tzv. *rezultantno magnetno polje.*

3.5.1. Magnetna reakcija armature rotora

Magnetno polje statora (glavno magnetno polje). Pri neopterećenom radu mašine (prazan hod) postoji samo magnetno polje statora. Ono je glavno (osnovno) magnetno polje mašine. Nastaje pod uticajem magnetnog napona pobudnog namotaja glavnih magnetnih polova. Magnetni napon po paru polova označićemo sa M_s. Pod njegovim djelovanjem u magnetnom kolu statora stvara se *glavni* ili *osnovni magnetni tok* Φ_g. Na sl. 3.55a. predstavljena je njegova raspodjela



Sl. 3.55. a) Magnetno polje statora pri praznom hodu, b) magnetno polje rekacije rotora.

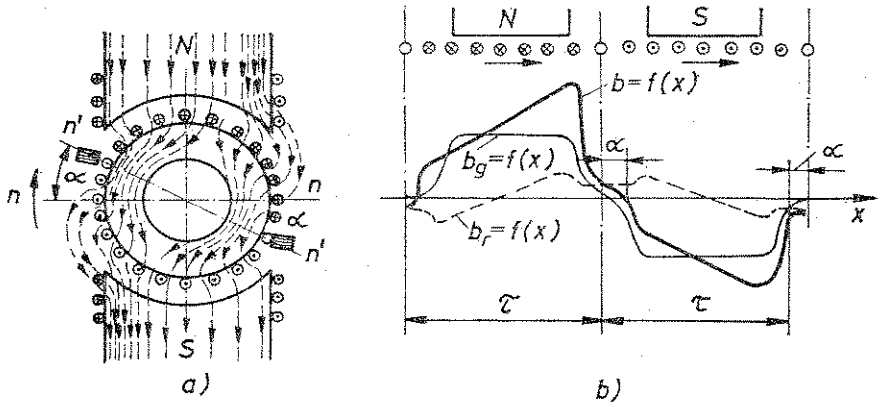
kod dvopolne mašine. Njegova raspodjela je simetrična u odnosu na osu glavnih magnetnih polova $y-y$, kao i u odnosu na geometrijsku neutralnu os $n-n$ (ona ima stalan položaj u prostoru) koja stoji okomito na magnetne silnice koje prolaze kroz rotor. U predjelu neutralne linije (neutralna zona) niti ulaze niti izlaze magnetne silnice iz rotora. Prema tome, nema presijecanja obima rotora (gdje se nalaze namotaji) magnetnim silnicama te nema ni indukcije u namotajima rotora.

Magnetno polje rotora (armature). Kada mašinu opteretimo, kroz namotaje rotora (armature) poteći će struja opterećenja, koja stvara magnetni napon rotora po paru polova M_r. Kada bi namotaji glavnih magnetnih polova bili nepobuđeni ($I_p=0$) i kada bismo podesili da kroz namotaj rotora koji miruje ($n=0$) teče struja dovedena iz nekog stranog izvora, u mašini bi se stvorio magnetni tok Φ_r koji je stvoren samo od magnetnog napona rotora. Raspodjela ovog magnetnog toka predstavljena je na sl. 3.55b. Njegova simetričnost podudara se sa linijom zamišljenih četkica, odnosno u posmatranom slučaju sa geometrijskom neutralnom linijom. Kako je, dakle, magnetna os polja rotora u neutralnoj zoni, to je magnetni tok rotora Φ_r okomit na glavni (uzdužni) magnetni tok Φ_g. Zbog toga se polje rotora naziva *poprečno magnetno polje.*

Ukoliko bismo četkice koje se nalaze u neutralnoj liniji pomjerili za neki proizvoljan ugao α, za isti ugao α i u istom smjeru došlo bi do pomjeranja ose simetrije magnetnog toka rotora, tj. os simetrije magnetnog toka rotora uvijek se poklapa sa zamišljenom osom pomjerenih četkica.

Rezultantno polje mašine. Međusobnim djelovanjem glavnog magnetnog polja statora Φ_g (nastalog pri praznom hodu mašine) i magnetnog polja rotora Φ_r (nastalog pri nekom opterećenju) nastaje *rezultantno magnetno polje mašine* Φ, čiji izgled je prikazan na sl. 3.56a. Polaritet magnetnih polova i smjerovi struja u provodnicima rotora na ovoj slici odgovaraju generatorskom režimu rada kada se rotor okreće u smjeru kretanja kazaljke na satu, a motorskom režimu rada kada se rotor okreće u smjeru suprotnom od kretanja kazaljke na satu.

Uticaj polja rotora na glavno magnetno polje. Ako krajeve polova ispod kojih zalaze provodnici rotora (kada se rotor okreće) nazovemo *ulazni*, a one ispod kojih se provodnici izmiču *izlazni*, onda iz poređenja magnetnih polja statora i rotora (sl. 3.55a. i b) vidimo da polje statora i polje rotora imaju isti smjer pod izlaznim (sabiraju se), a suprotne smjerove pod ulaznim krajevima polova (oduzimaju se). Ovo pravilo važi kada mašina radi kao generator. Kada mašina ima motorski režim rada, pravilo ćemo primjenjivati obrnuto.



Sl. 3.56. Uticaj polja rotora na glavno magnetno polje: a) rezultantno magnetno polje, b) dijagram raspodjele magnetne indukcije rezultatnog magnetnog toka duž obima rotora.

Na prvi pogled bismo mogli zaključiti da je rezultantno polje isto kao i glavno magnetno polje, jer onoliko koliko se glavno magnetno polje pod izlaznim krajevima polova povećalo toliko se smanjilo pod ulaznim krajevima polova. Bez obzira da li je ili nije rezultantno polje iste veličine kao i glavno, sigurno je da je rezultantno polje različitog oblika od glavnog magnetnog polja. Sa sl. 3.56a. vidimo da se uslijed djelovanja magnetnog polja rotora simetrična raspodjela glavnog magnetnog polja narušava, pri čemu se rezultantno magnetno polje pomjera prema izlaznim krajevima polova, tj. u smjeru kretanja kazaljke na satu (generatorski režim rada). Isto tako se neutralna os pomjera iz položaja geometrijske neutralne osi $n-n$ za

neki ugao α u položaj $n'-n'$ koji se naziva fizička neutralna osa. Ovo dejstvo polja rotora na glavno magnetno polje imamo samo u slučaju opterećenja. Vidimo, dakle, da polje rotora utiče na pomjeranje neutralne linije.

Na sl. 3.56b. prikazan je dijagram raspodjele magnetne indukcije rezultantnog magnetnog toka dužinom obima rotora. Krivulja $b=f(x)$ izvučena punom debelom linijom dobijena je sabiranjem (u svakoj tački ordinata) krivulja $b_g=f(x)$ i $b_r=f(x)$. Krivulja $b_g=f(x)$ predstavlja raspodjelu magnetne indukcije dužinom obima rotora, odnosno dužinom zračnog zazora pri praznom hodu mašine, dok krivulja $b_r=f(x)$ predstavlja raspodjelu magnetne indukcije dužinom obima rotora pri opterećenju mašine. Sa slike se vidi da magnetna indukcija b nije svuda ista, čak ni pod polovima. Naime, veća je na izlaznim, a manja na ulaznim krajevima magnetnih polova. Posljedica toga je da se trenutne vrijednosti napona indukovanih u aktivnim stranama svitaka u momentu kada se oni nalaze u zoni maksimalnih vrijednosti indukcije povećavaju, što dovodi da se napon između odgovarajućih susjednih lamela kolektora poveća. Ovaj napon pri povećanom opterećenju mašine može imati tako velike vrijednosti da izazove električni luk i time ugrozi normalan rad mašine.

Iz dosadašnjeg izlaganja zaključujemo da magnetno polje rotora nastalo opterećenjem mašine izaziva:

— pomjeranje neutralne linije i
— slabljenje glavnog magnetnog polja.

Pomjeranje neutralne linije zavisi od veličine magnetnog polja rotora, tj. od opterećenja. Ukoliko je opterećenje veće, ugao pomjeranja neutralne linije u odnosu na geometrijsku neutralnu liniju je veći i obratno. Kakve posljedice izaziva pomjeranje neutralne linije? Posmatrajući sl. 3.56a. uočavamo sljedeće: kada su četkice na geometrijskoj neutralnoj liniji, a rezultantno polje pomjereno, one nisu naspram provodnika u kojima se ne indukuje napon, već se nalaze naspram provodnika u kojima se vrši indukcija. Prema tome, čim lamela za koju je vezan provodnik napušta četkicu, a između njih postoji naponska razlika, nastaje iskrenje između te lamele i četkice. Dakle, uopšte pomjeranje neutralne linije izaziva iskrenje na kolektoru između četkica i lamela.

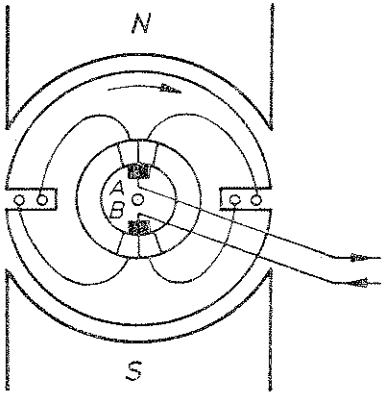
Osim ovog štetnog djelovanja, magnetno polje rotora, kako smo već kazali, slabi glavno magnetno polje i to nazivamo *magnetnom reakcijom* ili *protudjelovanje rotora*.

Slabljenje glavnog magnetnog polja ide do punog iznosa polja rotora. To znači, veće opterećenje, veća struja u rotoru, veće polje rotora, a time i veće slabljenje glavnog magnetnog polja. Međutim, pojačavanje glavnog magnetnog polja zavisi od zasićenosti magnetnog kola mašine, pa ukoliko je mašina više zasićena utoliko će biti stabije pojačavanje glavnog magnetnog polja. Da zaključimo: rezultantno magnetno polje manje je od glavnog magnetnog polja za razliku između slabljenja i pojačavanja glavnog magnetnog polja od polja rotora.

Kakve posljedice izaziva slabljenje glavnog magnetnog polja Pošto indukovani napon zavisi uglavnom od glavnog magnetnog toka ($E=k_2\Phi n$), to njegovo slabljenje izaziva opadanje indukovanog napona. To je drugo štetno djelovanje polja rotora na glavno magnetno polje. Pošto je magnetna reakcija rotora srazmjerna sa jačinom magnetnog polja koje stvara rotor, to će i ovo slabljenje indukovanog napona rasti sa povećanjem struje opterećenja. Ovo smanjenje indukovanog napona ispoljava se kao pad napona i naziva se *pad napona usljed magnetne reakcije rotora*, koji smo već spominjali kada smo govorili o osobinama i karakteristikama pojedinih vrsta generatora istosmjerne struje.

3.5.2. **Komutacija**

Jedna od najvažnijih pojava koja određuje rad istosmjerne mašine je *komutacija*. Pri okretanju rotora zajedno s njim okreće se i kolektor čije lamele jedna za drugom dolaze u dodir sa četkicama Pošto su za lamelu koja je kratko spojena četkicom spojeni krajevi svitka, to pri prelazu tog svitka iz jedne grane namotaja rotora u drugu nastaju promjene smjera struje u tom svitku. U to ćemo se najlakše uvjeriti posmatrajući sl. 3.57, na kojoj je prikazan rotor sa jednim svitkom. U posmatranom momentu četkice koje se nalaze u neutralnoj zoni stvaraju preko lamela kratak spoj svitka pa u njemu nema struje. Međutim, prije ulaska svitka u neutralnu zonu, kroz njega je tekla struja jednog smjera, npr. $+I$, a kada je izašao iz neutralne zone, u njemu se naglo promijenio smjer struje u $-I$. Pri promjeni struje u svitku od $+I$ do $-I$, promijeniće se i magnetni tok oko strana svitka od $+\Phi$ do $-\Phi$. Ova promjena magnetnog toka izaziva u svitku jedan kratkotrajan napon samoindukcije.



Sl. 3.57. Rotor sa jednim svitkom

$$e_k = -N_k \frac{\Delta \Phi_k}{\Delta t} \qquad \ldots\ldots (3.46)$$

gdje N_k označava broj kratkospojenih navojaka u svitku.

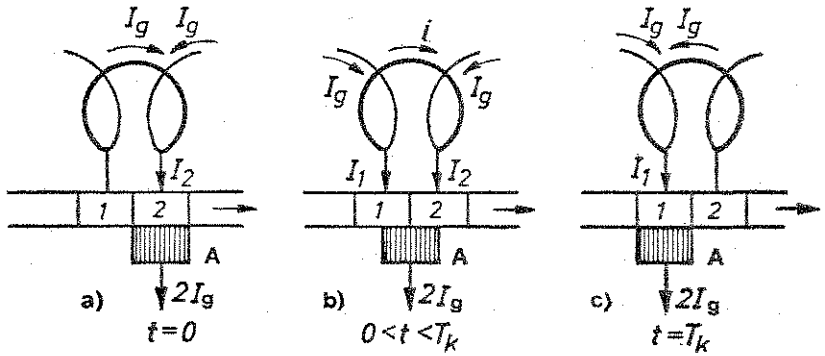
Taj indukovani napon, prema Lencovom zakonu, imaće takav smjer da se protivi promjeni struje koja ga je proizvela. On će, dakle, uticati na brzinu kojom se struja mijenja od $+I$ do $-I$. Struja u svitku zbog ovog napona može imati znatnu vrijednost u momentu kad lamela koja je u spoju sa ovim svitkom ostavlja četkicu. Zbog toga će se pri tom prekidu javiti električna iskra između četkice i lamele koja je ostavljena. Dakle, nepravilan tok ovog procesa uzrok je iskrenja pod četkicama. To iskrenje može biti toliko da ošteti kolektor i četkice i sasvim onesposobi mašinu za rad.

Suštinu procesa komutacije razmotrićemo na primjeru jednog svitka koji komutira prema nepokretnoj četkici čija je širina jednaka širini jedne lamele u tri karakteristična trenutka vremena, kako je prikazano na sl. 3.58. Proces komutacije teče redoslijedom koji ovisi o smjeru okretanja rotora, odnosno kolektora, u našem primjeru označen strelicom udesno.

U početnom trenutku komutacije (sl. 3.58a) četka pokriva cijelu lamelu 2. U tom trenutku uzeto je da je vrijeme $t=0$, a u posmatranom svitku (izvučeno debljom linijom) teče struja grane I_g koja ulazi u četkicu A preko lamele 2. U susjednom svitku u posmatranom trenutku također teče struja I_g i ona preko lamele 2 ulazi u istu četkicu A. Dakle, iz pozitivne četkice A izlazi struja $2I_g$. Kao što se vidi, struje koje teku iz lijeve i desne grane jednake su.

Međutim, kako se kolektor okreće, u jednom trenutku kasnije jedan dio lamele 2 počeće napuštati četkicu, a na njeno mjesto dolazi dio lamele 1 (sl. 3.58b). Kako se sa slike vidi, posmatrani svitak preko četkice koja spaja lamelu 1 i 2 nalazi

se u kratkom spoju. U svitku sada teče neka struja kratkog spoja koja je označena sa i. Iz lijeve paralelne grane teče struja I_g u lamelu 1, ali ne u cijelosti, jer jedan njezin dio odlazi u kratko spojeni svitak ($I_1=I_g-i$). U lamelu 2 teče struja I_g iz desne paralelne grane uvećana za struju i iz kratko spojenog svitka ($I_2=I_g+i$).



Sl. 3.58. Raspodjela struje u svitku koji komutira u tri karakteristična trenutka komutacije

Prema tome pišemo da je

$$I_1 = I_g + i$$
$$I_2 = I_g - i \qquad \ldots\ldots (3.47)$$

gdje su I_1 i I_2 struje u lamelama.

Ukupna struja koja ulazi u četkicu biće:

$$I = I_1 + I_2 = (I_g + i) + (I_g - i) = 2I_g,$$

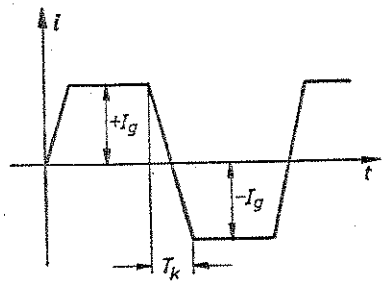
iz čega zaključujemo da se ukupna struja nije promijenila u odnosu na početni trenutak komutacije.

Na kraju perioda komutacije (sl. 3.58c) struja i u posmatranom svitku polako se smanjuje i u trenutku kada lamela 2 napusti četkicu, jednaka je nuli ($i=0$). Već u sljedećem trenutku kroz posmatrani svitak koji komutira poteći će struja I_g iz desne paralelne grane u lamelu 1 i četkicu, i sa sl. 3.58c. se jasno vidi da je njen smjer suptoran smjeru struje i koja je njime proticala dok je četkica još dodirivala lamelu 2. Na taj način struja će se u posmatranom svitku promijeniti od $+I_g$ na $-I_g$, tj. za $2I_g$. Ta promjena trajala je vrlo kratko vrijeme koje smo nazvali *trajanje* ili *perioda komutacije* T_k. Na sl. 3.59. prikazana je vremenska promjena struje u posmatranom svitku. U toku trajanja komutacije četkice stvaraju kratak spoj svitka koji komutira. Vrijeme T_k počinje u trenutku kada lamela koja je spojena sa početnom stranom svitka dođe u dodir sa četkicom, a završava se u trenutku njezinog potpunog ostavljanja. Pošto smo već kazali da su širine četkice i lamele jednake i ako zanemarimo debljinu izolacije između dvije susjedne lamele, onda je vrijeme trajanja komutacije dato formulom:

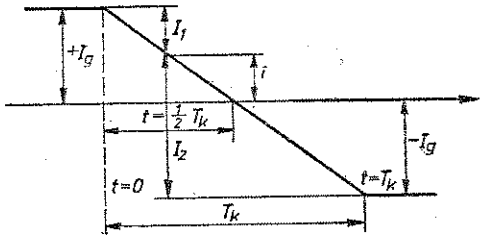
$$T_k = 60 \frac{1}{nk} \qquad \ldots\ldots (3.48)$$

gdje je n brzina okretanja rotora u minuti, a k broj lamela na kolektoru.

U posmatranom svitku u slučaju kada je $i=I_1$, struja komutacije linearno se mijenja sa vremenom od vrijednosti $+I_g$ (pri $t=0$) do vrijednosti $-I_g$ (pri $t=T_k$), prolazeći kroz nulu pri $t=1/2\ T_k$, kako je to predstavljeno na sl. 3.60. Ovakva *komutacija* naziva se *linearna*. Ona se još naziva i *idealna*, jer za vrijeme cijelog procesa komutacije ne postoje nikakve štetne propratne pojave.

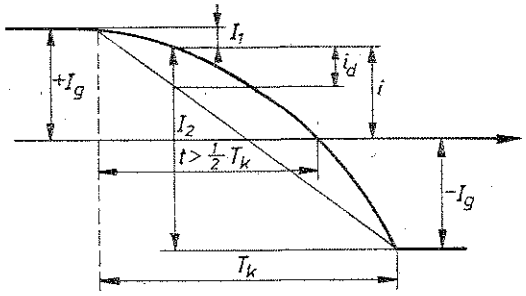


Sl. 3.59. Dijagram vremenske promjene struje u jednom svitku



Sl. 3.60. Linearna komutacija

Međutim, u praksi ne postoji idealna komutacija. Na proces komutacije koji je vrlo složen utiču, kako smo već ranije istakli, naponi samoindukcije i otpori u kolu posmatranog svitka. Što se tiče otpora u kolu svitka, važno je da prelazni otpor između lamela i četkica bude što manji, pa će tada komutacija biti dobra.



Sl. 3.61. Usporena komutacija

Kako smo već rekli, napon samoindukcije protivi se promjenama struje u kratko spojenom svitku koji komutira. Pod njegovim uticajem u kolu se javlja dodatna struja i_d koja usporava proces promjene struje komutacije i. U trenutku kada četkica podjednako pokriva lamele 1 i 2, struja komutacije i neće biti jednaka nuli kao u slučaju linearne komutacije, već će prolaziti kroz nulu pri $t>1/2T_k$, tj. komutacija postaje usporena, kako je prikazano na sl. 3.61. Sa slike se vidi da se promjena struje od 0 do $-I_g$ mora izvršiti u vrlo kratkom vremenu, pa će stoga na zadnjem odlazećem kraju četkice gustina struje imati vrlo veliku vrijednost, zbog čega je komutacija loša, tj. doći će do jakog iskrenja. Ovo iskrenje povećava se sa povećanjem opterećenja mašine i prenosi se na cijeli kolektor koji se okreće.

* * * * * * * * *

3.5.3. **Sredstva za sprečavanje štetnog djelovanja magnetne reakcije rotora i loše komutacije**

Da bismo štetno djelovanje magnetne reakcije rotora suzbili ili vršili nad njom kontrolu, a komutaciju učinili što povoljnijom, služe nam sljedeće mjere i sredstva, a to su:

- *pomjeranje četkica*,
- *kompaundni namotaji*,
- *kompenzacioni namotaji*,
- *pomoćni* ili *komutacioni polovi*.

Pomjeranje četkica. Da bismo štetna djelovanja izazvana pomjeranjem neutralne zone (iskrenje na kolektoru) izbjegli, višimo pomjeranje četkica na novu neutralnu zonu. Sada nemamo u jednoj grani rotora suprotne napone i četkice se nalaze naspram provodnika u kojima se ne indukuje napon, pa bi se moglo kazati da nema iskrenja. No, iskrenje i dalje postoji. Zašto? I dalje imamo napon samoindukcije i ona je, kako smo već utvrdili, glavni uzrok iskrenja. Iskrenje ćemo otkloniti na taj način što ćemo četkice pomaknuti preko neutralne zone, a pošto znamo da svici ne komutiraju u neutralnoj zoni nego izvan nje (u polnom području), postignuto je, kako nam pravilo desne ruke kaže, da se u njima sijećenjem silnica magnetnog polja pod suprotnim polom indukcije napon koji je suprotan naponu samoindukcije. Ako je ovaj napon po veličini jednak naponu samoindukcije, oni se međusobno potpuno poništavaju i, naravno, iskrenje na četkicama i kolektoru potpuno nestaje.

Problem komutacije ne možemo riješiti na zadovoljavajući način pomjeranjem četkica, jer bi kod svake promjene opterećenja (neutralna zona se pomjeri sa opterećenjem) trebalo opet izvršiti pomjeranje četkica. To, dakako, pravi velike poteškoće, a naročito kod mašina kod kojih se opterećenje znatno i često mijenja.

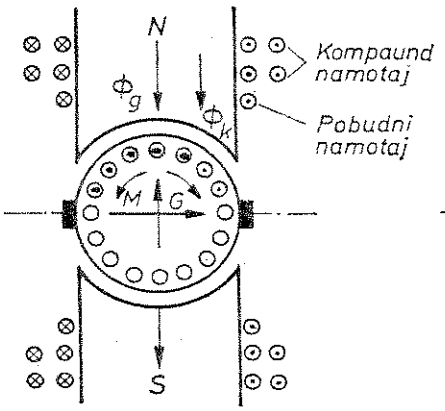
Mada su četkice pomjerene u novu neutralnu zonu, još uvijek postoje štetna djelovanja magnetne reakcije rotora, a nastaju i neke nove neugodnosti. Naime, kada se četkice pomjere za neki ugao magnetno polje rotora ima osim *poprečne* i svoju *uzdužnu komponentu (uzdužno polje reakcije rotora)*, koja ima suprotan smjer glavnom magentnom toku i djelomično ga poništava, što izaziva povećanje gubitka indukovanog napona u rotoru.

Znači, pomjeranje četkica upotrebljava se samo za mašine male snage koje u pogonu rade sa približno stalnim opterećenjem. Još da kažemo da je pomjeranje četkica u novu neutralnu zonu opravdano samo kod mašina koje nemaju ugrađene pomoćne polove, o kojima će biti govora kasnije.

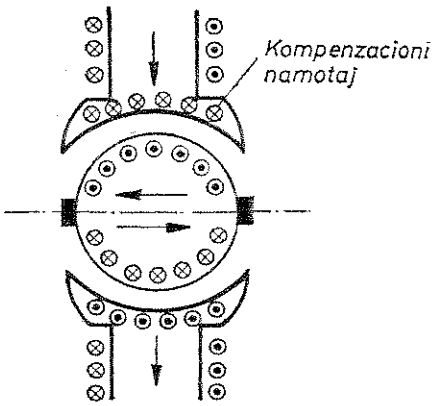
NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

Kompaundni namotaj. Kompaundni namotaj smješten je na glavne magnetne polove, kako je prikazano na sl. 3.62. Izveden je sa malim brojem navoja velikog presjeka i spojen je između četkica i priključnih stezaljki mašine, tako da kroz njega teče struja rotora. Zadatak mu je da stvori magnetni tok istog smjera kao i glavni pobudni namotaj. Na taj način on pojačava glavni magnetni tok Φ_g,

odnosno nadoknađuje po iznosu smanjenje indukovanog napona E izazvanog magnetnom reakcijom rotora. Naime, magnetni tok stvoren kompaundnim namotajem poništava uzdužnu komponentu magnetnog toka koji nastaje u rotoru i koji direktno, kako smo već ustanovili, slabi glavni magnetni tok. Na taj način glavni magnetni tok Φ_g ostaje nepromijenjen.



Sl. 3.62. Kompaundni namotaj



Sl. 3.63. Kompenzacioni namotaj

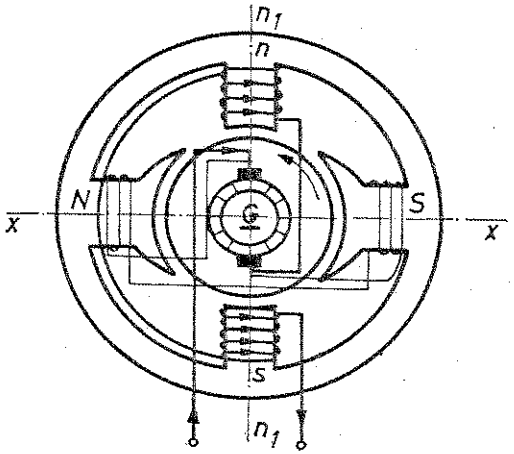
Kompaundni namotaj, osim poništavanja uzdužne komponente magnetnog toka rotora, nema nikakvog uticaja na ostale neugodnosti koje izaziva reakcija rotora (na položaj neutralne zone, napon među lamelama itd.). Ponekad kod generatora djeluje destabilizirajuće, jer se povećanjem opterećenja povećava i napon koji može biti veći od nominalnog.

Ipak, kompaundni namotaj ima svoj značaj i često se izvodi kod mašina svih snaga.

* * * * * * * * *

Kompenzacioni namotaj. Ovaj namotaj je smješten u utore koji se nalaze u nastavcima glavnih magnetnih polova, a spojeni su u seriju sa namotajem rotora, što znači da se napajaju strujom rotora, kako je prikazano na sl. 3.63. Pri tome smjer struje u ovom namotaju mora biti suprotan od smjera struje u dijelu namotaja rotora koji je naspram tog polnog nastavka. Stvoreni magnetni tok u kompenzacionom namotaju poništava poprečnu komponentu reakcije rotora, ali samo u zonama koje pokrivaju polni nastavci glavnih polova. Magnetno djelovanje nekompenzovanog dijela provodnika rotora ne utiču bitno na glavni magnetni tok, ali ima nepovoljan uticaj na dobru komutaciju. Izvedba kompenzacionog namotaja je vrlo skupa i upotrebljava se kod vrlo velikih mašina koje rade sa jako promjenljivim opterećenjem npr. valjaoničkih motora itd.

Pomoćni polovi. Da bi se obezbijedila dobra komutacija, savremene mašine se izvode sa specijalnim polovima koje smo nazvali pomoćni polovi. Njihov glavni zadatak je da stvore povoljan komutacioni magnetni tok u zoni komutacije čiji smjer mora biti suprotan smjeru poprečne komponente magnetnog toka rotora.



Sl. 3.64. Shema spoja glavnih i pomoćnih magnetnih polova

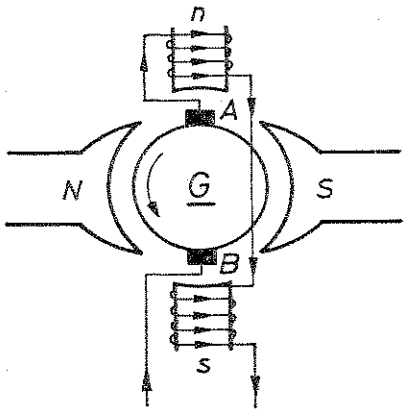
Pomoćni polovi pričvršćuju se na kućište mašine između glavnih magnetnih polova. Nalaze se u neutralnoj zoni, kako je prikazano na sl. 3.64, i manjih su dimenzija od glavnih magnetnih polova. Na njima se nalazi namotaj, izveden sa malim brojem navoja velikog presjeka, koji je spojen u seriju sa namotajem rotora, te kroz njega u slučaju bilo kakvog opterećenja teče cjelokupna struja rotora. U tom slučaju magnetni tok pomoćnih polova mijenja se srazmjerno sa strujom rotora, pa prema tome, srazmjerno i sa magnetnim tokom rotora.

Redoslijed glavnih i pomoćnih polova kod generatora u smjeru okretanja rotora je sljedeći: $N—s—S—n$. Dakle, poslije svakog glavnog pola dolazi pomoćni pol suprotnog polariteta, kako je prikazano na sl. 3.65.

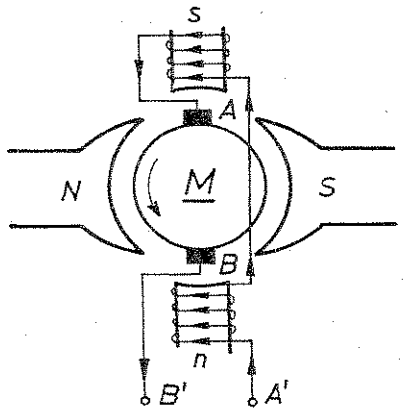
Kod motora je redoslijed glavnih i pomoćnih polova u smjeru okretanja rotora: $N—n—S—s$, tj. poslije svakog glavnog pola dolazi istoimeni pomoćni pol kako je predstavljeno na sl. 3.66.

Prilikom prelaska sa rada generatora na rad motora, unutrašnje veze pomoćnih polova ne treba dirati. Naime, pustimo li mašinu koja je radila kao generator, da radi kao motor u istom smjeru okretanja, vidjećemo da će se u namotajima pomoćnih polova promijeniti smjer struje, a time i polaritet pomoćnih polova. Redoslijed glavnih i pomoćnih polova kod motora, kako smo naprijed naveli, je ispunjen. Iz ovog izvodimo zaključak da struja u namotajima pomoćnih polova

treba da promijeni smjer svaki put kad struja u rotoru mijenja smjer. Dakle, ne mijenjajući veze pomoćnih polova, svaka mašina radiće kao motor ili kao generator, okrećući se u oba smjera i uvijek će biti zadovoljan uslov o redoslijedu glavnih i pomoćnih polova.



Sl. 3.65. Redoslijed glavnih i pomoćnih polova kod generatora



Sl. 3.66. Redoslijed glavnih i pomoćnih polova kod motora

Pomoćni polovi ne poništavaju cijeli magnetni tok rotora, već samo u oblasti neutralne zone, zadržavajući nepromijenjenu neutralnu liniju i stvarajući komutacioni magnetni tok za poništavanje napona samoindukcije. Znači, pomoćnim polovima spriječili smo pomjeranje neutralne linije — iskrenje, tj. uklonili lošu komutaciju, dok je jedan dio magnetnog toka rotora ostao neponišten, a time slabljenje indukovanog napona i dalje postoji. Stoga je potrebno poništiti magnetni tok rotora ne samo u predjelu neutralne zone nego i naspram glavnih magnetnih polova. To postižemo, kako smo već utvrdili, pomoću kompenzacionih namotaja.

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

3.5.4. Gubici snage i stepen korisnog djelovanja u mašinama istosmjerne struje

Snaga koju daju generator ili motor uvijek je manja od mehaničke snage pogonske mašine, odnosno električne snage mreže. Prilikom pretvaranja jednog oblika energije u drugi, u našem slučaju električne u mehaničku i obratno, dolazi do zagrijavanja mašine. Toplota se razvija zbog toga što se jedan dio mehaničke energije (kod generatora), odnosno električne (kod motora) ne pretvara u željeni oblik, nego i toplotu. Ova razvijena toplota predstavlja gubitak snage u mašini. Gubici snage u mašini mogu biti stalni i promjenljivi.

Stalni gubici. U stalne gubitke spadaju oni koji se javljaju i pri neopterećenom kao i pri opterećenom radu mašine. U ove gubitke spadaju:

Mehanički gubici. Nastaju usljed trenja između dijelova koji se dodiruju, a kreću se jedan prema drugom. To su, zapravo, gubici nastali usljed trenja između osovine i ležišta, između četkica i kolektora i, najzad, usljed trenja svih rotirajućih dijelova o vazduh. Ovome treba dodati i snagu koju troši ventilator koji se stavlja s jedne strane rotora da bi se kroz mašinu stvorilo strujanje vazduha za uspješno hlađenje zagrijanih dijelova. Zbog svega navedenog dolazi do zagrijavanja mašine i do gubitaka snage koje smo označili sa P_{meh}.

Magnetni gubici. Javljaju se u svim željeznim dijelovima mašine kroz koje se zatvaraju silnice magnetnog toka ili, bolje rečeno u kojima jačina magnetnog toka stalno mijenja svoju vrijednost. Pošto se ovi gubici javljaju samo u željeznim dijelovima mašine, oni se još nazivaju gubici u željezu i označavaju se sa P_{Fe}. Nastaju usljed histereze i vrtložnih struja.

Meki feromagnetni materijali imaju manje gubitke izazvane histerezom u odnosu na tvrde materijale. Zbog toga se meki feromagnetni materijali upotrebljavaju za izradu dijelova mašine izloženih histereznim gubicima. U praksi se ovi gubici računaju po praktičnim formulama, na primjer, Štajnmecova formula:

$$P'_{\text{Fe}}=\eta V f B^2_{\max} \qquad \ldots\ldots (3.49)$$

gdje je: P_{Fe} — gubitak snage usljed histereze u (W),

$B_{\max}$ — magnetna indukcija u (T), f — frekcencija u (Hz),

V — zapremina željeza u (m^3) i η — Štajnmecov koeficijent koji zavisi od vrste željeza (za legirano željezo kreće se od 0,6 do 1,2% silicija).

U statoru nemamo promjene jačine magnetnog toka, te nemamo ni histerezne gubitke.

Osim histereznih gubitaka, u željezu nastaju i gubici usljed vrtložnih struja. Da bi se gubici usljed vrtložnih struja smanjili, dijelove mašina koji su izloženi naizmjeničnom magnetisanju ne izrađujemo „pune", već kako smo već ranije kazali od tankih međusobno izolovanih (lameliranih) dinamo-limova. To naročito vrijedi za rotor i polne nastavke koji su izloženi naizmjeničnom magnetisanju. Praktična formula za izračunavanje gubitaka usljed vrtložnih struja je:

$$P'_{\text{Fe}}=\beta d^2 f^2 B^2_{\max} G \qquad \ldots\ldots (3.50)$$

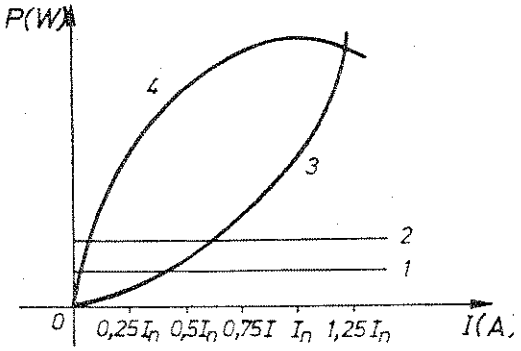
gdje je: β — 1920 za limove koji se upotrebljavaju u mašinama istosmjerne struje, d — debljina limova u (m) i G — masa limova u (kg).

Ukupni gubici snage usljed histereze i vrtložnih struja po 1 kg mase limova iznose:

$$P_{\text{Fe}}=P'_{\text{Fe}}+P''_{\text{Fe}}=B^2_{\max}(\eta f+\beta d^2 f^2) \qquad \ldots\ldots (3.51)$$

Tačnu vrijednost određivanja gubitaka snage u željezu ovom formulom nećemo dobiti zbog toga što se magnetni gubici mijenjaju obradom materijala, zatim spontanim strukturnim promjenama u materijalu i sa temperaturom. U prvim mjesecima rada mašine zbog spontane strukturne promjene u materijalu rastu gubici snage dok se strukturni odnosi ne stabiliziraju. To je tzv. magnetno starenje.

Promjenljivi gubici. Ovi gubici se javljaju samo pri opterećenom radu mašine. Nastaju u svim provodnicima kroz koje, prilikom rada mašine, teče električna struja, dakle, u namotajima rotora i statora, u namotajima pomoćnih polova u kompenzacionim namotajima i na prelazu struje od kolektora na četkice. Pošto se ovi gubici javljaju u bakarnim provodnicima, nazivamo ih gubici u bakru P_{Cu}. Pošto ovi gubici nastaju usljed aktivnog otpora i stvorene džulove toplote u prethodno nabrojanim namotajima, još se nazivaju i električni gubici.



Sl. 3.67. Zavisnost gubitaka i stepena korisnog djelovanja od struje opterećenja

Na sl. 3.67. prikazane su sve tri vrste gubitaka (mehaničke, magnetne i električne) krivuljama, zavisno od struje opterećenja.

Mehanički gubici zavise od brzine okretanja mašine, te kada je ona stalna, i mehanički gubici su stalni, nezavisno od opterećenja. Oni su znači isti i pri praznom hodu i pri opterećenju mašine. Na dijagramu su predstavljeni horizontalnom linijom 1, naravno, paralelnom sa apscisnom osom na koju nanosimo struju opterećenja.

Ako mašina radi sa stalnim naponom i sa stalnom brzinom okretanja, onda su magnetni gubici približno isti pri svim opterećenjima. Prikazani su linijom 2 koja je također paralelna sa apscisnom osom.

Što se tiče električnih gubitaka u namotajima rotora i namotajima statora, prema Džulovom zakonu ($I^2 R$) srazmjerni su sa kvadratom struje opterećenja. Predstavljeni su krivuljom 3, koja kvadratično raste.

Tako smo dobili ukupne gubitke:

$$\Sigma P_g = P_{meh} + P_{Fe} + P_{Cu} \qquad \ldots\ldots (3.52)$$

Iz svega ovog zaključujemo da utrošena snaga nije u potpunosti iskorištena. Zapravo, jedan dio utrošene snage potrošen je na savladavanje gubitaka u mašini.

Stepen korisnog djelovanja. Odnos između izlazne (korisne) snage P_{iz} koju mašina daje i ulazne (utrošene) P_{ul} koju mašina prima predstavljen je brojem koji je uvijek manji od jedan i naziva se stepen korisnog djelovanja η. Dakle:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} < 1 \qquad \ldots\ldots (3.53)$$

Ako je zbir gubitaka u mašini ΣP_g, onda je ukupna ili utrošena snaga $P_{ul} = P_{iz} + \Sigma P_g$, a korisna $P_{iz} = P_{ul} - \Sigma P_g$.

Kod generatora je za mjerenje pristupačnija izlazna snaga $P_{iz} = UI$, a kod motora ulazna snaga $P_{ul} = UI$, te se stepen korisnog djelovanja ili kratko iskorištenje

kod generatora računa obično preko korisne snage P_{iz} i zbira gubitaka ΣP_g, a kod motora preko utrošene snage P_{ul} i zbira gubitaka ΣP_g. Tako dobivamo formule za izračunavanje stepena korisnog djelovanja.

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{P_{iz}}{P_{iz} + \Sigma P_g} = \frac{UI}{UI + \Sigma P_g} \quad \text{za generator}$$

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{P_{ul} - \Sigma P_g}{P_{ul}} = \frac{UI - \Sigma P_g}{UI} \quad \text{za motor} \qquad \ldots\ldots (3.54)$$

Ako izraze pomnožimo sa 100, dobićemo postotak iskorištene energije. Na dijagramu sl. 3.67. krivulja 4 pokazuje kako se mijenja stepen korisnog djelovanja. Odmah nam pada u oči da je stepen iskorištenja najbolji oko nominalnog opterećenja, a da je njegova vrijednost manja pri malim opterećenjima i pri preopterećenjima.

Stepen korisnog djelovanja kod mašina velikih snaga (oko 1 000 kW) može dostići vrijednost i do $\eta = 0{,}93$, kod srednjih snaga (oko 100 kW) do $\eta = 0{,}9$, kod manjih snaga (oko 5 kW) do $\eta = 0{,}82$ i kod vrlo malih snaga (oko 100 W) do $\eta = 0{,}70$.

Iz ovog zaključujemo da mašine većih snaga imaju povoljniji stepen korisnog djelovanja od mašina manjih snaga.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta stvara magnetno polje statora i kakva je njegova uloga u mašini istosmjerne struje?
2. Kako nastaje magnetno polje rotora i kakav je njegov uticaj na glavno magnetno polje?
3. Šta znači magnetna reakcija rotora, šta ona izaziva i kakve su zbog toga posljedice?
4. Objasni pojam komutacije i njene posljedice!
5. Kako otklanjamo štetno djelovanje magnetne reakcije rotora i lošu komutaciju?
6. Kakvu ulogu imaju kompenzacioni namotaji, a kakvu pomoćni polovi?
7. Koji gubici nastaju u mašini istosmjerne struje i kako dobivamo stepen korisnog djelovanja?

3.6. SPECIJALNE MAŠINE ZA ISTOMJEERNU STRUJU

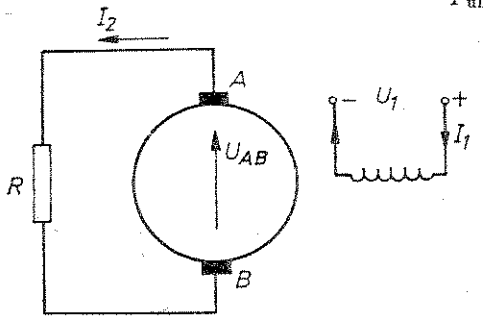
Ovdje spadaju normalne mašine istosmjerne struje sa specijalnom izvedbom, kao što su valjaonički motori, kranski motori, brodski istosmjerni generatori itd. Pod nazivom „specijalne istosmjerne mašine" mislimo uvijek na one kod kojih se nešto fizikalno mijenja u odnosu na normalne mašine, o kojima je do sada bilo govora. Ovdje ćemo dati osnovnu fizikalnu sliku na osnovu koje se može razumjeti djelovanje takve mašine. Najčešće se primjenjuju mašine istosmjerne struje sa poprečnim magnetnim tokom.

3.6.1. Istosmjerne mašine sa poprečnim magnetnim tokom

Mašine sa poprečnim magnetnim tokom imaju vrlo široku primjenu u uređajima za elektrozavarivanje i električnu rasvjetu vozova, a naročito kao obrtno elektromašinsko pojačalo.

Obrtno elektromašinsko pojačalo (amplidin). To je specijalni generator istosmjerne struje koji služi kao pojačalo snage, čiju izlaznu snagu P_{iz} možemo mijenjati pomoću ulazne P_{ul}. Odnos izlazne i ulazne snage koju još nazivamo i upravljačkom predstavlja koeficijent pojačanja snage

$$k_p = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} \qquad \ldots\ldots (3.55)$$



Sl. 3.68. Shema generatora istosmjerne struje sa nezavisnom pobudom

Obrtna elektromašinska pojačala postigla su vrlo široku primjenu u raznim industrijskim granama za automatsko upravljanje. Snagu upravljačkih signala pojačavaju razni davači kao što su npr. obrtni transformatori, selsini i dr.

Najjednostavnije obrtno elektromašinsko pojačalo je normalni generator istosmjerne struje sa nezavisnom pobudom (sl. 3.68). Poznato nam je da snaga u kolu rotora (izlaz pojačala) zavisi od pubudnog namotaja (ulaz pojačala). Mijenjajući vrijednost struje kroz pobudni namotaj koji u ovom slučaju služi kao upravljački, omogućeno nam je da u širokim granicama možemo mijenjati vrijednost izlazne snage. Na taj način upravljamo procesom pretvaranja mehaničke snage koju generator dobiva preko pogonskog motora u električnu snagu koju generator daje na svojim krajevima. Uzmemo li da je snaga pobude kod normalnog generatora 1% snage kola rotora, uz oznake prema slici možemo pisati da je

$$U_{ac} I_2 = 100 U_1 I_1 \qquad \ldots\ldots (3.56)$$

tj. impuls u pobudnom kolu se za sto puta pojačao u kolu tereta.

Ovakav stepen pojačanja snage ne ispunjava sve zahtjeve savremenih sistema automatskog regulisanja, pa su zbog toga izvedene specijalne mašine koje te zahtjeve ispunjavaju. Prije svega, tu spada obrtno elektromašinsko pojačalo istosmjerne struje sa poprečnim magnetnim tokom. Ovo pojačalo kratko se naziva *amplidin* (amplidyne, skraćeno od engl. Amplifier dyne-pojačalo dina, tj. sile).

Na sl. 3.69. predstavljena je principijelna shema amplidina. Sa slike vidimo da su na kolektoru rotora smještena dva para četkica: jedan par je smješten duž uzdužne ose $A-B$, a drugi dužinom poprečne ose $a-b$. Posljednji par četkica je kratko spojen. Na statoru je smješteno više namotaja: pobudni namotaj (PN) koji stvara magnetni tok Φ_1, kompenzacioni namotaj (KN) koji je serijski spojen u kolo opterećenja, a zadatak mu je da svojim magnetnim tokom Φ_k potpuno poništi magnetni tok rotora Φ' i upravljački namotaj (UN) uključen u kolo iz koga želimo dobiti neki impuls koji utiče na rad pojačala. Rotor amplidina izveden je isto kao kod normalne mašine istosmjerne struje.

Način rada amplidina sastoji se u ovome. Ako na pobudni namotaj priključimo upravljački signal U_1, kroz njega će poteći struja I_1 koja će stvoriti uzdužni magnetni tok Φ_1. On će biti vrlo male vrijednosti zbog toga što se pri velikom koeficijentu pojačanja snage na ulaz amplidina dovodi mala snaga $P_1 = U_1 I_1$. Pri okretanju rotora uzdužni magnetni tok Φ_1 koji djeluje u poprečnoj osi mašine indukovaće u njegovom namotaju mali napon E_2, tj.:

$$E_2 = k_2 \Phi_1 n \qquad \ldots\ldots (3.57)$$

Pošto je ukupni otpor kratko spojenog kola mali, indukovani napon E_2 kroz namotaje rotora protjeraće struju znatne vrijednosti I_2:

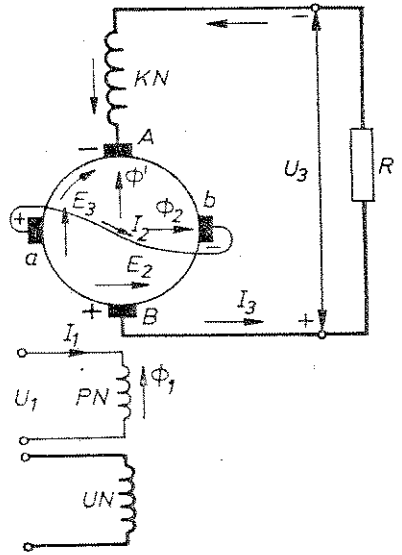
$$I_2 = \frac{E_2}{R_{ra-b}} \qquad \ldots\ldots (3.58)$$

U određenim uslovima ova struja I_2 stvara relativno veliki poprečni magnetni tok Φ_2, koji u kolu četkica $A-B$, tj. u namotaju rotora indukuje znatan napon E_3:

$$E_3 = k_2 \Phi_2 n \qquad \ldots\ldots (3.59)$$

pod čiji uticajem u kolu tereta teče struja

$$I_3 = \frac{E_3}{R_T + R_{rA-B}},$$



Sl. 3.69. Principijelna shema amplidina

gdje je R_{rA-B} ukupni otpor uzdužnog kola rotora.

Budući da se tom strujom stvoreni magnetni tok kompenzira magnetnim tokom kompenzacionog namotaja (KN), primarni tok Φ_1 neće zavisiti od struje I_{A-B}, a prema tome ni od snage koju generator daje.

Na ovaj način pojačanje snage odvija se u dva stepena objedinjena u jednoj mašini. Prvi stepen sačinjavaju upravljački namotaj i poprečno kolo rotora gdje se snaga $P_1 = U_1 I_1$ pojačava do snage $P_2 = E_2 I_2$ i drugi stepen koji čine poprečno i uzdužno kolo rotora gdje se snaga $P_2 = E_2 I_2$ pojačava do snage $P_3 = E_3 I_3$.

Primjenjujući formulu (3.57) i sve ovo što smo naprijed utvrdili, na lak način izračunavamo ukupni koeficijent pojačanja snage amplidina:

$$k_p = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} = \frac{P_3}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_2}{P_1} = k_{p1} k_{p2} \qquad \ldots\ldots (3.60)$$

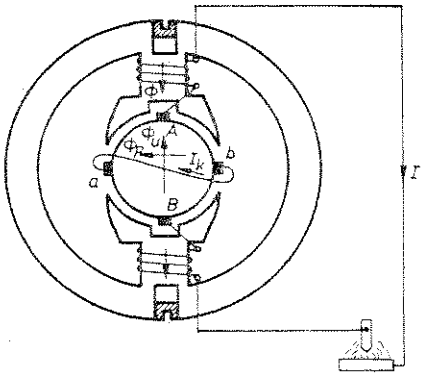
Koeficijent pojačanja snage amplidina veoma je velik i dostiže vrijednost $k_p \approx 100\,000$.

Osim koeficijenta pojačanja, za rad pojačala značajni su stepen njegovog odziva i njegova stabilnost rada.

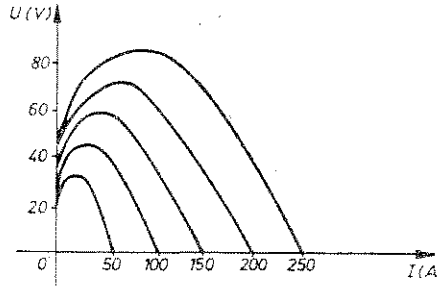
Pod odzivom pojačanja podrazumijeva se brzina promjene izlazne snage (u prvom i drugom stepenu pojačanja) zbog promjene snage u upravljačkom namotaju. Odziv pojačanja ima veliki značaj, i ukoliko je izvršen za kraće vrijeme (od 0,1 do 0,25 s), kažemo da je dobar. Da bi se poboljšao odziv, pojačalo se u cijelosti izvodi od dinamo-limova, i ukoliko je to moguće, sa smanjenim zračnim zazorom.

Da bi stabilnost rada pojačala bila što bolja, odnosno da ne bi nastali tzv. slobodni električni titraji koji narušavaju njegov rad, izvedba elektromagnetnih veza koje postoje između namotaja pojačala čije se osi podudaraju mora biti savršena.

Generator za zavarivanje. Generator za zavarivanje ili Rosenbergov zavarivač je, u stvari, serijski generator istosmjerne struje. Njegova shema prikazana je na sl. 3.70, sa koje se vidi da se na njegovom statoru nalaze dva megnetna



Sl. 3.70. Shema generatora za zavarivanje



Sl. 3.71. Vanjska karakteristika generatora za zavarivanje

pola s velikim polnim nastavcima i s promjenljivim bezželjeznim prostorom u jezgrima magnetnih polova. Po kolektoru klize dva para četkica. Prvi par četkica smješten je duž poprečne ose $a-b$. Četkice ovog para međusobno su kratko spojene. Drugi par četkica smješten je dužinom uzdužne ose $A-B$, tj. u osi glavnog magnetnog toka. Na njih je spojeno kolo zavarivanja, pa se zato ove četkice nazivaju radnim. Da bi komutacija pod ovim četkicama bila što bolja, u polnim nastavcima izveden je bezželjezni prostor.

Namotaj rotora i pobudni namotaj su preko radnih četkica spojeni u seriju.

Kada generator radi, tj. kad je opterećen, njegovo kolo zavarivanja je zatvoreno neposredno kratkim spojem ili preko električnog luka.

Kod generatora za zavarivanje postoje dva magnetna toka, i to su: osnovni magnetni tok koji stvaraju glavni magnetni polovi i koji uslovljava napon, odnosno struju I_k u kratko spojenom namotaju rotora, i poprečni magnetni tok kratkospojenog namotaja rotora, koji je stvorila upravo ta struja I_k.

Poprečni magnetni tok Φ_p indukuje u namotaju rotora napon E koji vlada između radnih četkica i pod čijim se uticajem javlja struja opterećenja (zavarivanja) I. Ova struja opterećenja I u rotoru stvara uzdužni magnetni tok Φ_u koji je po svom smjeru suprotan osnovnom magnetnom toku. Na taj način, usljed magnetne reakcije rotora osnovni magnetni tok biva oslabljen ($\Phi_u = \Phi_{su} - \Phi_{ru}$), što direktno smanjuje pobudnu struju i napon na radnim četkicama generatora. Iz ovog slijedi da poprečni magnetni tok Φ_p predstavlja radni tok generatora, dok pomoću umanjenog uzdužnog toka Φ_u dobivamo njegove vanjske karakteristike koje su sasvim silazne (sl. 3.71) i koje nam pokazuju da režim rada kratkog spoja ne predstavlja opasnost za generator. Naime, i pri iznenadnom smanjenju otpora vanjskog kola, odnosno povećanja struje, usljed magnetne reakcije rotora dolazi do odgovarajućeg smanjenja napona U na radnim četkicama, pa struja ostaje približno stalna, što odgovara potrebama generatora za zavarivanje. To znači da generator pri kratkom spoju (kod zavarivanja) osigurava približnu stalnu vrijednost struje uz promjenljivu vrijednost otpora luka.

Mijenjanjem volumena bezželjeznog prostora u polnim jezgrima pomoću željeznih zavrtanja mijenja se i magnetna provodnost magnetnog kola, čime se postiže da generator pri radu u kratkom spoju daje razne vrijednosti struje, npr. 50, 100, 150, 200, 250 ampera, kako je prikazano na sl. 3.71.

Pogonska mašina kod generatora za zavarivanje sa poprečnim magnetnim tokom je asinhroni motor. Njegovo puštanje u rad vrši se u stanju praznog hoda.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Gdje se primjenjuju specijalne mašine istosmjerne struje?
2. Nacrtaj shemu elektromašinskog pojačala i objasni kako dolazi do pojačanja snage!
3. Kako radi generator za zavarivanje?

KOLEKTORSKE MAŠINE ZA NAIZMJENIČNU STRUJU I PRETVARAČI

4.1. JEDNOFAZNI KOLEKTORSKI MOTORI NAIZMJENIČNE STRUJE

4.1.1. Potreba za kolektorskim motorima naizmjenične struje

Iz dosadašnjeg izlaganja smo vidjeli da se motiri naizmjenične struje (asinhroni i sinhroni motori, o kojima će kasnije biti govora) razlikuju od motora istosmjerne struje pored ostalog i po tome što oni nemaju kolektor. To znači da nemaju poteškoća sa komutacijom, a s obzirom na jednostavnu konstrukciju i sigurnost u radu sasvim je jasno zašto su se asinhroni motori tako masovno proširili u praksi.

Medutim, iako se asinhroni motori tako mnogo primjenjuju, tj. iako za njih kažemo da su gotovo idealna vrsta električnih motora, ipak i oni imaju svojih mana (nedostataka). To su: loše regulacione osobine u poređenju sa motorima istosmjerne struje, koji posjeduju finu regulaciju brzine okretanja, relativno mali pokretni momenat i prilično nizak faktor snage $\cos\varphi$.

Nastojanje konstruktora da se napravi motor koji će imati dobre regulacione osobine i koji će se napajati naizmjeničnom strujom, početkom ovog vijeka dovelo je do razvoja kolektorskih motora za naizmjeničnu struju, kojima je postignuta fina (ravnomjernija) i ekonomičnija regulacija brzine okretanja. Izvode se kao jednofazni i trofazni. Jednofazni kolektorski motori (zamjenjuju jednofazne asinhrone motore, koji imaju loše osobine) danas se mnogo više upotrebljavaju od trofaznih. Najrašireniju primjenu ima jednofazni serijski kolektorski motor, nazvan univerzalni motor male snage od 0,5 do 300 W. To su motori široke primjene pri pogonu ručnog alata na električni pogon, u aparatima za domaćinstvo, kao npr. kod usisivača prašine, šivaćih mašina, ventilatora itd. Zbog složenosti i skupoće izvedbe, loše komutacije i dr., kolektorski motori većih snaga danas se upotrebljavaju u izuzetnim slučajevima, npr. za pokretanje mehanizama koji zahtijevaju regluaciju brzine okretanja u vrlo širokim granicama.

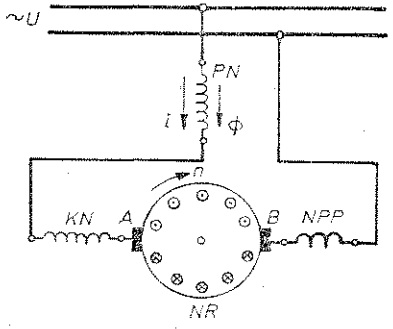
4.1.2. Jednofazni serijski kolektorski motor

Odranije nam je poznato da smjer okretanja motora istosmjerne struje zavisi od smjera struje koja teče kroz namotaj rotora i od smjera struje kroz pobudni namotaj. Također nam je poznato da se smjer okretanja može promijeniti samo promjenom smjera struje kroz jedan od spomenutih dvaju namotaja, jer istovremena

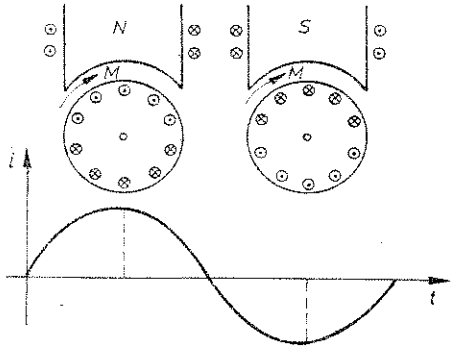
promjena smjera struje kroz oba namotaja ne izaziva promjenu smjera okretanja. Pošto kod serijskog motora istosmjerne struje teče ista struja i kroz pobudni namotaj i kroz rotor, proizlazi da će njegov smjer okretanja ostati nepromijenjen iako se npr. promijeni smjer struje koju dovodimo u motor. Upravo ovo saznanje dovelo je naučnike na ideju da bi istosmjerni motor mogao raditi ako ga priključimo nad mrežu naizmjeničnog napona. Naime, iako naizmjenična struja stalno mijenja svoj smjer, a budući da ga mijenja istovremeno i u namotaju rotora i u pobudnom namotaju, ona ne može izazvati promjenu smjera okretanja.

Na osnovu izloženog moglo bi se pomisliti da je istosmjerni motor dovoljno priključiti na mrežu odgovarajućeg naizmjeničnog napona pa da on pod imenom naizmjeničnog kolektorskog motora normalno i uspješno radi. Međutim, njegov rad pod ovim uslovima bio bi vrlo komplikovan. Naime, pored pojava koje su se javljale kod istosmjernih motora i koje su otežavale njihov ispravan rad, ovdje zbog oscilovanja naizmjenične struje nastaju dodatne neželjene pojave koje su prouzrokovane transformatorskim djelovanjem motora. Zbog toga se jednofazni serijski kolektorski motori, iako nebitno, konstruktivno razlikuju od motora istosmjerne struje. Naime, kako kroz kućište kolektorskog motora, te kroz njegove jezgre magnetnih polova i njihove nastavke prolazi promjenljivi magnetni tok, a ne stalni, to njegovi dijelovi moraju biti izvedeni ne od masivnog željeza već od željeznih međusobno izolovanih limova, koji imaju bolju magnetnu provodnost i koji smanjuju gubitke snage. Inače, stator može biti izveden sa istaknutim i neistaknutim (skrivenim) magnetnim polovima. Kod ovih drugih koji su prihvatljiviji u utore se stavljaju pobudni namotaj (*PN*), kompenzacioni namotaj (*KN*) i namotaj pomoćnih polova (*NPP*). Pošto namotaji imaju različitu namjenu, utori, a prema tome i zupci statora nisu isti. Pobudni namotaj zajedno sa namotajem pomoćnih polova smješta se u veće utore, dok se raspoređeni kompenzacioni namotaj stavlja u manje utore statora. Što se tiče rotora i njegovog namotaja, on je isti kao i kod mašina istosmjerne struje.

Princip rada. Kada jednofazni serijski kolektorski motor, čija je principijelna shema predstavljena na sl. 4.1, priključimo na odgovarajući napon, njegovim pobudnim namotajem (*PN*), kompenzacionim namotajem (*KN*), rotorskim



Sl. 4.1. Principijelna shema jednofaznog serijskog kolektorskog motora *PN* — pobudni namotaj, *NPP* — namotaj pomoćnih polova, *NR* — namotaj rotora i *KN* — kompenzacioni namotaj



Sl. 4.2. Sa naizmjeničnom strujom (istovremena promjena struje u rotoru i pobudnom namotaju) smjer obrtnog momenta ostaje isti

namotajem (*RN*) te namotajem pomoćnih polova (*NPP*) poteći će jednofazna naizmjenična struja *i*. Ta naizmjenična struja u pobudnom namotaju stvara promjenljivi magnetni tok Φ koji djeluje na provodnikę rotora kroz koje teče struja na taj način da ga zakreće u jednom smjeru, pa mašina tako počinje raditi kao motor. Pošto se u serijskom kolektorskom motoru istovremeno mijenjaju smjer struje u rotoru i smjer pobudnog magnetnog toka Φ, obrtni (elektromagnetni) momenat sve vrijeme zadržaće isti smjer djelovanja kako je prikazano na sl. 4.2.

Naizmjenični pobudni magnetni tok u jednofaznom serijskom kolektorskom motoru uzrok je još nekih neželjenih pojava do kojih dolazi pri njegovom radu. Naime, pored indukovanog napona e_r koji se stvara u namotaju rotora zbog njegove rotacije, naizmjenični magnetni tok oscilujući kroz rotor indukuje u njegovim namotajima i *napon transformacije* e_t.

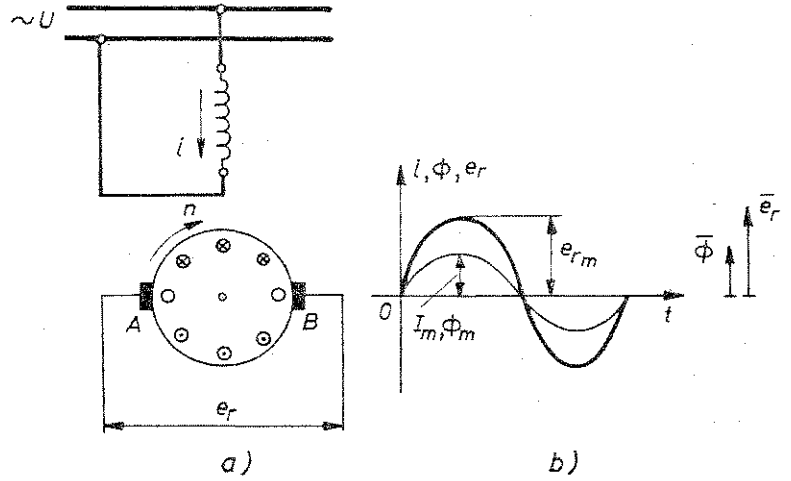
Ako se struja *i* i magnetni tok Φ mijenjaju po harmoničnom zakonu, onda je:

$$i = I_m \sin \omega t, \quad \ldots : \quad (4.1)$$

$$\Phi = \Phi_m \sin (\omega t - \alpha)$$

gdje je α ugao za koji magnetni tok Φ zaostaje za strujom *i* zbog gubitaka snage u željezu magnetnog kola motora.

Indukovani napon rotacije (okretanja) e_r. Zavisno od smjera okretanja rotora, *indukovani napon rotacije* e_r nalazi se u fazi ili protufazi sa pobudnim magnetnim tokom. Naime, kada je magnetni tok koji se mijenja po harmoničnom zakonu (formula 4.1) jednak nuli ($\Phi=0$), magnetne indukcije u zračnom zazoru nema, tj. indukovani napon rotacije jednak je nuli ($e_r=0$). Pri porastu magnetnog toka rasti će i njegova indukcija, kao i indukovani napon e_r koji će se pojaviti na četkicama *A* i *B* (sl. 4.3a). U momentu kada magnetni tok postigne najveću vrijednost ($\Phi=\Phi_m$), indukovani napon rotacije također postiže svoju maksimalnu vrijednost e_{rm}, a potom zajedno sa magnetnim tokom prolazi kroz nulu i tako redom u suprotnom

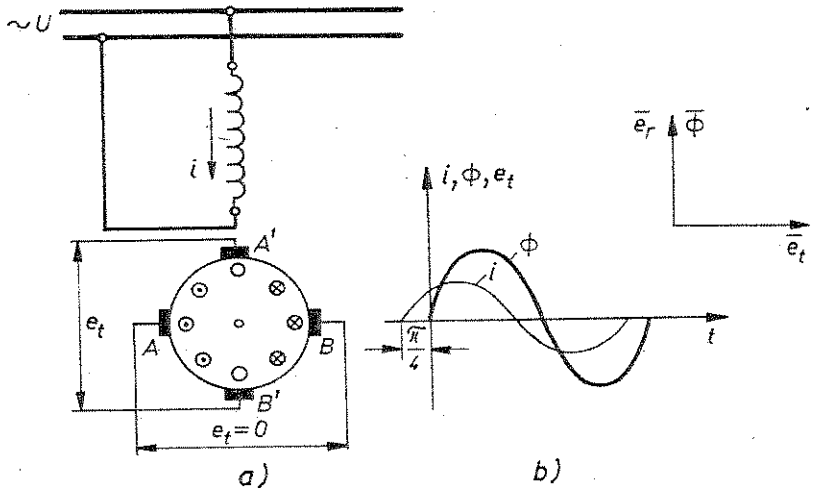


Sl. 4.3. Objašnjenje nastanka indukovanog napona rotacije: a) shema spoja, b) zavisnosti $i=f(t)$, $\Phi=f(t)$ i $e_r=f(t)$.

smjeru, kako je prikazano na sl. 4.3b. To znači, za dati smjer okretanja rotora indukovani napon rotacije istovremen je sa magnetnim tokom i ima kao i on istu frekvenciju. Nije teško zaključiti da će se promjenom smjera okretanja rotora promijeniti i smjer indukovanog napona rotacije.

Indukovani napon transformacije e_t. Indukovani napon transformacije e_t ne zavisi od brzine okretanja rotora. Indukuje se u rotoru usljed vremenski promjenljivog pobudnog magnetnog toka. Dobio je naziv *indukovani napon transformacije*, jer pobudni namotaj možemo posmatrati kao primar, a namotaj rotora kao sekundar transformatora.

Na sl. 4.4a. vidimo da su indukovani naponi u provodnicima rotora (za naznačeni momentalni smjer pobudnog magnetnog toka) koji se nalaze na različitim stranama u odnosu na osu pobudnog namotaja različitog smjera. Ukoliko bi se



Sl. 4.4. Objašnjenje nastanka indukovanog napona transformacije: a) shema spoja, b) vektorski prikaz.

četkice našle u osi pobudnog magnetnog toka (položaj $A'-B'$), indukovani napon transformacije imao bi maksimalnu vrijednost. On ima istu frekvenciju kao dovedeni napon mreže i fazno zaostaje za 1/4 periode za magnetnim tokom kao i za indukovanim naponom rotacije e_r koji je u fazi sa magnetnim tokom (sl. 4.4b).

Pošto se četkice A i B nalaze u osi okomitoj na osu magnetnih polova, indukovani napon transformacije jednak je nuli ($e_t=0$), jer se njegovo djelovanje u odnosu na četkice poništava. Međutim, on se javlja u svicima koji su preko četkica kratko spojeni, što izaziva lošu komutaciju, odnosno iskrenje na kolektoru.

Dok kompenzacioni namotaji poništavaju magnetnu reakciju rotora i time poboljšavaju faktor snage $\cos\varphi$, pomoćnim polovima nije moguće na zadovoljavajući način riješiti problem komutacije. Iako se redovito nalaze u ovim motorima, pomoćni polovi ne mogu mnogo pomoći kada motor krene, jer se ne može ukloniti indukovani napon transformacije u svitku koji komutira.

Da bi indukovane napone kod komutacije držali na dovoljno niskim vrijednostima, potrebno je upotrijebiti naizmjeničnu struju što niže frekvencije, svitke namotaja rotora sa malo navoja i samopobudu magnetnih polova.

Jednofazni serijski kolektorski motor ima osobine (mehaničke i radne karakteristike) slične onima koje ima motor za istosmjernu struju. Uz nepromijenjeni dovedeni napon brzina im se znatno smanjuje porastom opterećenja, ali zato imaju veoma dobru vučnu snagu. Dobra im je osobina što imaju veliki pokretni momenat.

Regulacija brzine kao i mijenjanje njenog smjera okretanja vrše se na isti način kao kod serijskog motora istosmjerne struje.

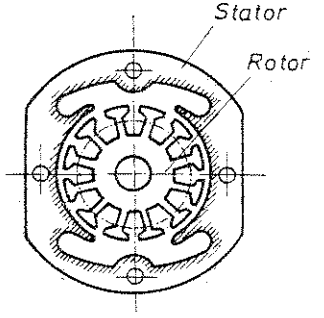
Ovi motori se uglavnom upotrebljavaju u električnoj vuči. Njihova snaga kreće se od 300 do 2 500 kW. Radi smanjenja indukovanog napona transformacije i poboljšanja komutacije, kolektorski motori za vuču priključuju se na mrežu naizmjenične struje čija je frekvencija smanjena na 25 Hz. Isto tako, ovi motori se priključuju na kontaktnu mrežu preko transformatora za smanjenje i regulaciju napona. To činimo da bismo dobili napon na četkicama koji će odgovarati najpovoljnijoj komutaciji. Oni imaju vrlo visok stepen korisnog djelovanja i faktor snage ($\eta\approx 0{,}9$ i $\cos\varphi\approx 0{,}95\div 0{,}97$).

4.1.3. **Univerzalni kolektorski motor**

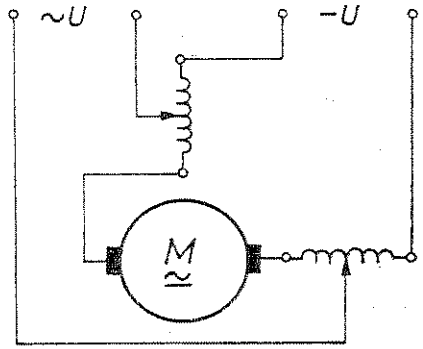
Jednofazni serijski kolektorski motori malih snaga (od 5 do 350 W), koji su podešeni tako da mogu raditi ili pomoću istosmjerne struje napona 110 i 220 V ili pomoću naizmjenične struje napona 127 i 220 V i frekvencije 50 Hz, nazivaju se univerzalni kolektorski motori. Brzina okretanja ovih motora kreće se od 1 500 do 40 000 °/min. Što je veća brzina okretanja faktor snage $\cos\varphi$ je bolji.

Princip rada ovog motora je isti kao i kod jednofaznog serijskog kolektorskog motora.

Međutim, oni se znatno razlikuju po izvedbi. Naime, cijelo magnetno kolo univerzalnog motora izvedeno je od izolovanih limova, kako je prikazano na sl. 4.5. To je potrebno zbog toga da bi se smanjili gubici u željezu pri radu motora sa naizmjeničnom strujom. Polovi statora su istaknuti, dok se pobudni namotaj izvodi koncentrično obično sa izvodima, tako da se pri radu sa naizmjeničnom stru-



Sl. 4.5. Magnetno kolo univerzalnog kolektorskog motora



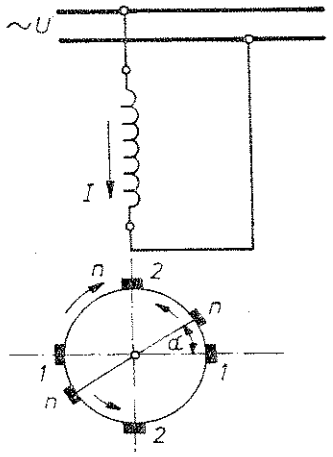
Sl. 4.6. Shema univerzalnog kolektorskog motora

jom s ciljem poboljšanja karakteristika upotrijebi manji broj navoja. Na sl. 4.6. prikazana je shema univerzalnog kolektorskog motora. Vidi se da ovaj motor nema ni pomoćne polove ni kompenzacione namotaje (vrlo jednostavne izvedbe), a iskustvo je pokazalo da kod malih snaga i bez ovih namotaja mogu savladati komutaciju, odnosno sami se pri radu ponašaju kao kompenzovani.

Primjena univerzalnih kolektorskih motora je vrlo široka. Upotrebljavaju se za pogon mašina u domaćinstvu, industriji i zanatstvu (usisivača prašine, šivaćih i računskih mašina, frizerskih mašina, ručnih bušilica, raznih mlinova i miksera u domaćinstvu itd.).

4.1.4. **Repulzioni motor**

Kod repulzionog motora postoje samo dva namotaja (namotaj statora i namotaj rotora) i što je najinteresantnije, s obzirom da se radi o kolektorskom motoru, nemaju međusobnu električnu povezanost. Naime, namotaj statora priključen je na mrežu naizmjenične struje, dok se namotaju rotora čije su četkice kratko spojene predaja električne energije vrši indukcionim putem.



Sl. 4.7. Principijelna shema repulzionog motora

Na sl. 4.7. predstavljena je shema repulzionog motora. Pušta se u rad na taj način da se njegov stator direktno priključi na mrežu naizmjenične struje, a četkice pomoću specijalnog uređaja dovedu u neutralnu osu, u našem primjeru u položaj $n-n$, kako je prikazano na slici 4.7.

Od položaja četkica koji je određen uglom α između ose namotaja statora i ose namotaja rotora bitno zavise osobine repulzionog motora. Razlikujemo dva osnovna položaja čektica. U prvom položaju os četkica okomita je na os namotaja statora ($\alpha=90°$). U tom slučaju indukovani napon transformacije e_t na četkicama jednak je nuli ($e_t=0$), a pošto nema električne veze, to je i struja u rotoru I_2 također jednaka nuli ($I_2=0$), pa motor ne razvija obrtni momenat ($M=0$).

U drugom položaju četkica osi namotaja statora i rotora se podudaraju ($\alpha=0$). U tom slučaju indukovani napon rotora E_2, a time i struja u rotoru I_2 postižu najveće vrijednosti. Budući da su magnetni tokovi statora i rotora suprotno usmjereni, opet je obrtni momenat motora jednak nuli ($M=0$).

Međutim, zakrenemo li kratkospojene četkice na desnu ili lijevu stranu za neki ugao α, rotor motora počeće se okretati na lijevu ili desnu stranu. Smjer okretanja rotora suprotan je smjeru pomjeranja četkica. Pretpostavimo li da su četkice postavljene u međupoložaj, kao što je prikazano na sl. 4.7, tada će u svitku koji je preko lamela kolektora kratko spojen poteći struja. Zbog te struje magnetno polje počinje odbojno (repulzivno) djelovati na svitak silom koja zakreće rotor u našem primjeru u smjeru okretanja kazaljke na satu. Polje će djelovati repulzivno na jedan te isti svitak samo dotle dok je taj isti svitak kratko spojen. Međutim, nije teško zaključiti da će motor ostati u trajnom okretanju, jer usljed početnog i uvijek istog položaja četkica dođe sljedeći svitak u kratki spoj na istom mjestu pa onda on podržava rotor u okretanju itd.

Da zaključimo: puštanje u rad i promjena smjera okretanja repulzionog kolektorskog motora vrše se pomjeranjem kratko spojenih četkica. Pomjeranjem četkica u različite položaje mogu se postići različite brzine motora, kao i različiti obrtni momenti. Tako npr. najveći obrtni momenat dobićemo ako se četkice pomjere za ugao $\alpha=75°\div80°$. Pri nominalnom režumu rada ovaj ugao ima vrijednost između 65° i 75°.

Ovaj motor ima slične radne karakteristike kao jednofazni serijski kolektorski motor. Prednost mu je što je regulisanje brzine jednostavno (samo pomjeranjem četkica), a nedostatak lošija komutacija. Izvodi se za manje i srednje snage od 0,5 do 75 kW, a primjenjuje se za pokretanje radnih mašina koje imaju stalnu potrebu za mijenjanje brzine kao što su predionične mašine, dizalice itd.

4.2. **PRETVARAČI**

Pretvarači su obrtne električne mašine koje pomoću obrtnih dijelova pretvaraju naizmjeničnu struju u istosmjernu. Njihova funkcija može biti i obrnuta, tj. mogu istosmjernu struju pretvarati u naizmjeničnu, zatim naizmjeničnu struju jedne frekvencije u naizmjeničnu struju druge frekvencije ili istosmjernu struju jednog napona u istosmjernu struju drugog napona itd. Tu spadaju motor — generatori, kaskadni pretvarači i jednoarmaturni pretvarač. Ovdje ćemo detaljno obraditi jednoarmaturni pretvarač.

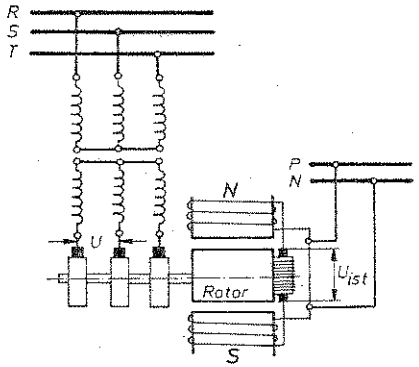
4.2.1. **Jednoarmaturni pretvarač**

Jednoarmaturni pretvarač (konvertor) je električna mašina koja u istom rotoru pretvara naizmjeničnu struju u istosmjernu i obratno.

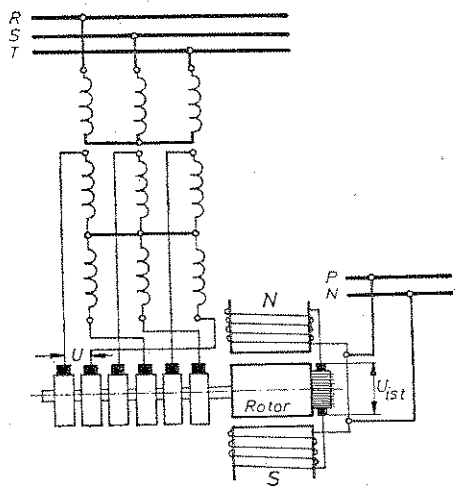
Konstruktivno jednoarmaturni pretvarač je mašina istosmjerne struje kojoj su dodati klizni prstenovi smješteni na osovini rotora sa strane suprotne kolektoru. Jednoarmaturni pretvarači mogu biti izvedeni kao jednofazni (s dva klizna prstena), kao trofazni (s tri klizna prstena), pa čak i kao šestofazni (sa šest kliznih prstenova). Klizni prstenovi preko kojih se vrši priključenje pretvarača na mrežu naizmjenične struje nalaze se na osovini s jedne strane namotaja rotora (armature), dok se kolektor, sa kojeg se vrši odvođenje istosmjerne struje, nalazi na osovini sa druge strane armature.

Namotaj rotora (armature), dakle, ima dvostruku ulogu: služi kao rotor sinhrone mašine i kao rotor istosmjerne mašine.

U praksi se najčešće upotrebljavaju trofazni jednoarmaturni pretvarači (sl. 4.8) i šestofazni jednoarmaturni pretvarači (sl. 4.9). Sa slika se vidi da je sa naizmjenične strane jednoarmaturni pretvarač spojen na mrežu naizmjenične struje preko transformatora čiji se napon može regulisati.



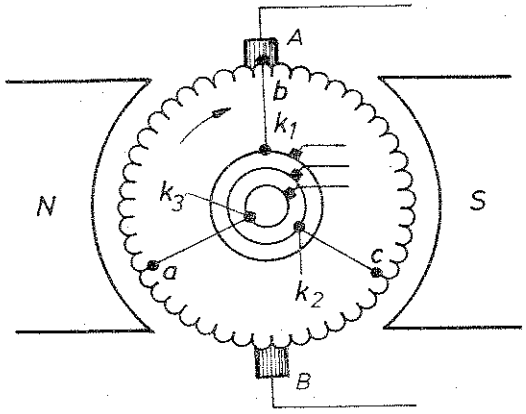
Sl. 4.8. Trofazni jednoarmaturni pretvarač



Sl. 4.9. Šestofazni jednoarmaturni pretvarač

Princip djelovanja jednoarmaturnog pretvarača. Na sl. 4.10. prikazana je shema rotorskog (armaturnog) namotaja dvopolnog trofaznog pretvarača. Pošto je u datom slučaju broj pari grana namotaja rotora $a=1$, imaćemo tri tačke a, b i c pomaknute međusobno za 120° i priključene na tri klizna prstena k_1, k_2 i k_3. S strane istosmjerne struje na kolektor su u neutralnoj osi smještene četkice A i B.

Zavrtimo li rotor pretvarača nekim pogonskim strojem, u njegovom namotaju indukovaće se naizmjenični napon. U tom slučaju na kolektorskim četkicama A i B dobićemo istosmjerni napon (kolektor služi kao ispravljač indukovanog napona u rotoru), dok će na četkicama kliznih prstenova djelovati trofazni naizmjenični na-



Sl. 4.10. Shema namotaja ratora trofaznog jednoarmaturnog pretvarača

pon. U ovom slučaju jednoarmaturni pretvarač postaje dvostruki generator koji na jednoj strani daje naizmjeničnu struju, a na drugoj strani istosmjernu. Pri tome nije potreban nikakav izvor pobudne struje, jer istovremeno s pokretanjem iz istosmjernog dijela pretvarača u pobudni namotaj teče pobudna struja. Jednoarmaturni pretvarač najčešće upotrebljavamo za pretvaranje naizmjenične struje u istosmjernu. Na naizmjeničnu mrežu priključujemo ga preko transformatora, s tim što ga prije priključenja dovodimo na sinhronu brzinu. To činimo pomoću nekog vanjskog pogonskog stroja ili dovođenjem istosmjerne struje u pretvarač sa istosmjerne strane. Nakon priključenja pretvarač radi sa strane kliznih prstenova kao sinhroni motor, a sa strane kolektora kao istosmjerni generator. Na taj način imamo proces pretvaranja električne energije naizmjenične struje u mehaničku a mehaničke u električnu energiju istosmjerne struje u istom rotoru. Interesantno je napomenuti da iz jednoarmaturnog pretvarača dobiveni istosmjerni napon ne ovisi o pobudi, nego o veličini dovedenog naizmjeničnog napona, kao i to da je dobiveni istosmjerni napon uvijek veći od efektivne vrijednosti dovedenog naizmjeničnog napona. U stvari, postoji stalni odnos između dovedenog naizmjeničnog napona $\sim U$ i istosmjernog napona $-U$ koji vlada na četkicama kolektora. Dakle:

$$\sim U=\frac{-U}{\sqrt{2}}=0{,}707U \qquad \ldots\ldots \text{(4.2)}$$

To znači da je ispravljeni napon veći od naizmjeničnog napona za $\sqrt{2}$ puta. Ako npr. trošila trebaju ispravljeni napon od 110 V, tada je na naizmjeničnoj strani potrebno dovesti naizmjenični napon efektivne vrijednosti od 78 V. Pošto u mrežama ne postoji ovakav napon, jasno je da transformator na naizmjeničnoj strani pretvarača ima zadatak da vrši njegovu regulaciju.

Jednoarmaturni pretvarač može pretvarati istosmjernu struju u naizmjeničnu, mada je ovakav oblik upotrebe rijedi. Na kolektor i pobudni namotaj dovodimo istosmjernu struju, pa pretvarač radi sa strane kolektora kao istosmjerni motor sa paralelnom pobudom, a sa strane kliznih prstenova kao sinhroni generator. Na taj se način električna energija istosmjerne struje pretvara u mehaničku, a mehanička se u istom rotoru pretvara u električnu energiju naizmjenične struje.

Jednoarmaturni pretvarači izvode se za razne snage, već prema potrebi, ali ograničenog napona na istosmjernoj strani do 3 000 V zbog poteškoća oko izvedbe kolektora.

Upotrebljavaju se u industriji nafte, hemijskoj industriji i sličnim pogonima gdje se naizmjenična struja pretvara u istosmjernu.

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

1. Koje prednosti imaju kolektorski motori naizmjenične struje nad asinhronim motorima?
2. Gdje se primjenjuju kolektorski motori?
3. Nacrtaj shemu jednofaznog serijskog kolektorskog motora i objasni njegov način rada!

4. Kako nastaju indukovani naponi rotacije i transformacije i kako oni utiču na komutaciju?
5. U čemu je razlika između univerzalnog kolektorskog motora i jednofaznog serijskog kolektorskog motora i zašto se naziva univerzalni?
6. Nacrtaj shemu repulzionog motora, uoči razliku prema ostalim kolektorskim motorima i objasni način njegovog rada!
7. Nacrtaj shemu jednoarmaturnog pretvarača i objasni njegov princip djelovanja!
8. Gdje se primjenjuje jednoarmaturni pretvarač?

SINHRONE MAŠINE

5.1. FIZIČKE OSNOVE NA KOJIMA POČIVA RAD SINHRONIH MAŠINA

5.1.1. Značaj sinhronih mašina u elektroprivredi

Sinhrone mašine dijelimo na sinhrone generatore i sinhrone motore.

Sinhroni generatori pretvaraju mehaničku energiju pogonskog stroja u električnu. To je, znači, električna mašina koja proizvodi električnu energiju naizmjenične struje. Pošto je redovno mreža trofazna, to se gotovo uvijek susrećemo s trofaznim sinhronim generatorima. Jednofazni sinhroni generatori primjenjuju se vrlo rijetko.

Sinhroni motori od kojih je poseban slučaj sinhroni (fazni) kompenzator za poboljšanje faktora snage $\cos\varphi$, koriste se kod dalekovoda za regulaciju napona u mreži.

Postavlja se pitanje kakav značaj imaju sinhroni generatori u elektroprivredi!

Krajem prošlog i početkom ovog vijeka izvor električne energije bio je uglavnom generator istosmjerne struje. Budući da električna energija ima veoma široku primjenu a za ekonomičnije prenošenje velikih količina energije najpogodnija je naizmjenična struja, sinhroni generator je potisnuo generator istosmjerne struje iz svih elektrana.

Sinhroni generator, koji proizvodi električnu energiju za sva trošila, glavni je dio elektrane. Elektrane se grade s više sinhronih generatora spojenih u jedan elektroenergetski sistem.

U hidroelektrani kao pogonski stroj sinhronog generatora služi vodena turbina (Kaplanova, Francisova ili Peltonova), a u termoelektrani parna turbina.

Shema izražena riječima za hidroelektranu kazuje mnogo koju ulogu i značaj ima sinhroni generator u njoj i ukupno u elektroenergetskom sistemu: voda, brana, turbina, SINHRONI GENERATOR, transformator, razvodno postrojenje, dalekovod, razvodno postrojenje i trošila. Za termoelektranu važi približno ova shema: ugalj, kotao, para, turbina, SINHRONI GENERATOR, razvodno postrojenje, dalekovod, razvodno postrojenje i trošila.

Jedinice snage sinhronih generatora danas se jako razlikuju: od malih generatora na slabijim vodotocima (nekoliko stotina kW), preko generatora u industrijskim elektranama (1 ÷ 30 MW) jedinične snage do sistema u hidro i termoelektranama srednje veličine koje iznose 30, 100, 200 i 300 MW. Velikim generatorima smatraju se jedinice iznad 400 MVA.

Najveća jedinica turbogeneratora izvedena je 1975. godine u nuklearnoj elektrani od 1 640 MVA, dok će u skoroj budućnosti narasti i do 2 000 MVA za dvopolne turbogeneratore.

Najveća jedinica hidrogeneratora izgrađena je od 766 MVA, npr. u hidroelektranama Itaipu na granici Brazila i Paragvaja.

Povećanje jedinice snage generatora dovelo je i do promjene parametara generatora i njihovih eksploatacionih karakteristika, pa se hlađenje obavlja vodikom ili direktno vodom.

Razvojem poluprovodnika došlo je do bitnih izmjena u sistemima pobude generatora.

Standardni naponi su 3,15, 6,3 i 10,5 kV.

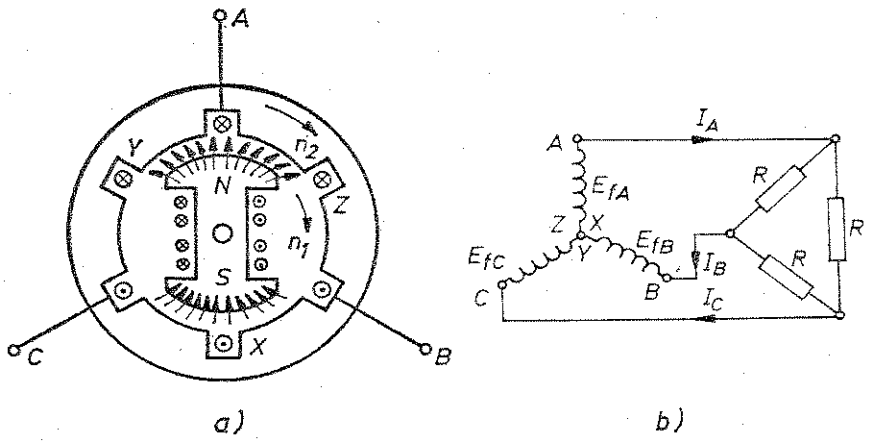
Standardna frekvencija je 50 Hz u Evropi i 60 Hz u SAD i Kanadi.

Faktor snage $\cos\varphi$ kreće se oko 0,8.

5.1.2. **Način rada sinhronog generatora**

Kako na najjednostavniji način možemo dobiti naizmjenični napon, odnosno naizmjeničnu struju, pokazali smo kada smo govorili o generatorima istosmjerne struje. Naime, recimo da smo naizmjenični napon, odnosno struju kod uređaja koji je predstavljao jednostavni naizmjenični generator uzimali sa navojka, preko kliznih prstenova i četkica (vidi sl. 3.1) i naglasimo da je to prihvatljivo samo kod generatora sasvim malih snaga i nižih napona. Ukoliko je proizvedena električna energija višeg napona i struje, odvod struje preko kliznih prstenova je veoma nepogodan zbog moguće pojave iskrenja na četkicama, oštećenja izolacije namotaja rotora, što bi zbog visokog napona bilo vrlo opasno.

Pošto je za pojavu elektromagnetne indukcije svejedno da li se okreće dio mašine koji stvara magnetno polje (induktor) ili onaj u kome se indukuje napon



Sl. 5.1. Trofazni sinhroni generator: a) principijelni sastav sinhronog generatora, b) simetrično opterećenje sinhronog generatora.

(indukt), jasno je da ćemo usvojiti tip mašine kod koje je induktor rotor, a indukt stator, jer su ovdje i uzimanje struje i zaštita izolacije jednostavniji.

Sve rotorske veličine uslovno ćemo označavati indeksom „p" (pobuda), a veličine statora bez indeksa.

Upravo takav generator s magnetnim polovima i pobudnim namotajem na rotoru i trofaznim namotajem smještenim u utore statora prikazan je na sl. 5.1a.

Stator sinhronog generatora izveden je isto kao i stator asinhrone mašine. Njegovi namotaji mogu biti izvedeni kao jednofazni, dvofazni i trofazni. Najčešće se upotrebljava trofazni, koji je prikazan na sl. 5.1a, a čiji su fazni namotaji međusobno prostorno pomaknuti za 120° ili 2/3 polnog koraka. Na rotoru, odnosno njegovim magnetnim polovima nalazi se pobudni namotaj. Kroz njega propuštamo istosmjernu struju koju preko kliznih prstenova i četkica dovodimo iz nekog stranog izvora istosmjerne struje. Ukoliko pobudna struja ima stalnu vrijednost (I_p=const.) od nje stvoreni magnetni napon biće također stalan.

Dakle:

$$M_p = I_p N_p = \text{const.} \qquad \ldots\ldots (5.1)$$

gdje je:

M_p — magnetni napon

N_p — broj navoja pobudnog namotaja

Ovaj magnetni napon stvara pobudni magnetni tok mašine čije silnice izlaze iz sjevernog pola, prolaze kroz zračni zazor, dijele se u statoru na dva jednaka dijela i ponovo kroz zračni zazor se vraćaju u južni pol rotora.

Ovdje je radi jednostavnosti uzeto da svaki fazni namotaj statora ima samo jedan svitak. Inače, već smo naučili kada smo govorili o namotajima statora asinhronog motora, da se oni izvode sa većim (naravno određenim) brojem svitaka. Značajno je napomenuti da se krajevi faznih namotaja dovode na priključnu (izolacionu) kutiju koja se nalazi na kućištu statora. Pošto se ovdje radi o proizvodnji električne energije visokog napona i vrlo velike struje, jasno je da se izolacija može lakše izvesti na dijelu mašine koji miruje nego na dijelu mašine koji se okreće.

Kada pogonski stroj okreće rotor generatora, sa njegovim polovima se okreće i pobudni magnetni tok. To pokazuje da se obrtni magnetni tok kod sinhrone mašine proizvodi mehaničkim putem. Okreće li se rotor nekom stalnom brzinom n_1, silnice njegovog magnetnog toka sjeći će nepokretne provodnike faznih namotaja statora i u svakom ponaosob indukovaće naizmjenični napon E_f čija je frekvencija

$$f = \frac{pn_1}{60}\ \text{(Hz)} \qquad \ldots\ldots (5.2)$$

Pošto je broj navoja svakog faznog namotaja isti, vrijednost indukovanog napona u sve tri faze biće jednaka. Kako su fazni namotaji prostorno pomaknuti za 120°, to će i indukovani naponi u njima zaostajati jedan za drugim za isti ugao i tako obrazovati simetrični trofazni sistem.

Između stezaljki A, B i C možemo izmjeriti vrijednost tog indukovanog napona, čija veličina ovisi još i o spoju namotaja. Naime, kod spoja namotaja u zvijezdu izmjereni indukovani napon između stezaljki A i B biće $E_{AB} = \sqrt{3}E_f$, a kod spoja u trougao $E_{AB} = E_f$. Sve ove pojave dešavale su se kada je sinhroni

generator bio neopterećen, tj. u praznom hodu, pa i njegov indukovani napon nazivamo naponom praznog hoda i označavamo ga sa E_0.

Priključimo li na stezaljke namotaja statora A, B i C simetrično trofazno trošilo (jednaki aktivni otpori R), kako je prikazano na sl. 5.1b, poteći će kroz njih struje I_A, I_B i I_C jednake vrijednosti, međusobno vremenski pomaknute, kao i pripadajući indukovani naponi za jednu trećinu periode ($1/3T=1/3\,2\pi=2/3\pi$). Takve struje stvoriće magnetni napon statora, a ovaj magnetni tok koji će se po njegovom obodu okretati. S obzirom na frekvencije indukovanih napona (formula 5.2), okretni magnetni tok imaće istu brzinu i smjer okretanja kao i rotor s pobudnim namotajem, tj.:

$$n_2=\frac{60f}{p}=\frac{60}{p}\,\frac{pn_1}{60}=n_1 \qquad \ldots\ldots (5.3)$$

Upravo zbog toga što se i rotor s pobudnim namotajem i njegovim okretanjem stvoreni magnetni tok statora okreću istom brzinom ($n_1=n_2$), ovako izvedena mašina naziva se *sinhrona mašina*.

Relativna brzina okretnog magnetnog toka statora u odnosu na okretni magnetni tok rotora jednaka je nuli, tj. magnetni tokovi su međusobno nepokretni. Ovo čini osnovu rada sinhronih mašina, jer za ma koje pretvaranje energije mora da postoji magnetna ravnoteža.

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

5.1.3. Generatorski i motorski režim rada

Svaka sinhrona mašina je reverzibilna, tj. može da radi i kao generator i kao motor. Prethodno smo vidjeli da će sinhrona mašina raditi kao generator ako pogonski stroj sa regulatorom održava sinhronu brzinu okretanja. Pri tome, kada sinhrona mašina radi kao generator, može biti samostalna, tj. sama može snabdijevati neka trošila električnom energijom ili raditi za neku električnu mrežu paralaleno sa drugim sinhronim generatorima. U ovom drugom slučaju sinhrona mašina može da daje ili da uzima električnu energiju mreži, tj. da radi kao generator ili kao motor.

Ukoliko je namotaj statora priključen na mrežu napona U i frekvencije f, njime će poteći višefazne struje koje će stvoriti obrtno magnetno polje čiju brzinu okretanja n određujemo formulom 5.3. Međusobnim djelovanjem ovog polja i magnetnog polja što ga stvara struja rotora nastaje elektromagnetni momenat mašine M. Njegovu približnu veličinu koja djeluje između rotora i statora odredićemo na sljedeći način. Odranije znamo da je snaga obrtnog magnetnog polja P_{em} (vidi formulu 2.38) jednaka proizvodu elektromagnetnog momenta M i ugaone brzine obrtnog magnetnog toka ω:

$$P_{em}=M\omega \qquad \ldots\ldots (5.4)$$

Snaga obrtnog magnetnog polja razlikuje se od električne snage statora P za onoliko koliko iznose gubici snage u bakru statora P_{Cu}. Dakle:

$$P_{em}=P\mp P_{Cu} \qquad \ldots\ldots (5.5)$$

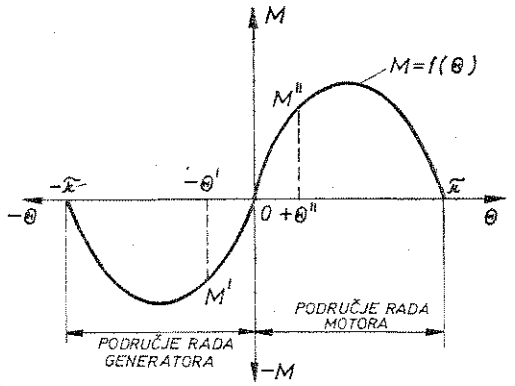
pri čemu znak $-$ važi za generator, a znak $+$ za motor.

Pošto su kod sinhronih mašina srednjih i velikih snaga gubici snage u bakru statora P_{Cu} mali u odnosu na njegovu električnu snagu P, možemo ih zanemariti, pa će snaga obrtnog magnetnog polja P_{em} biti jednaka električnoj snazi statora P ($P_{em}=P$).

Ne ulazeći u detaljna razmatranja, približna vrijednost elektromagnetnog momenta M sinhrone mašine je

$$M=\frac{P_{em}}{\omega}=\frac{P}{\omega}=\frac{qUEf}{\omega X}\sin\Theta \qquad \ldots\ldots (5.6)$$

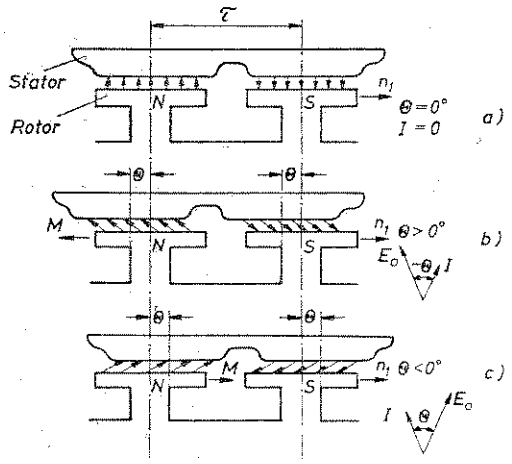
Iz formule vidimo da se elektromagnetni momenat M mijenja po zakonu sinusa, odnosno, zavisnost $M=f(\Theta)$ predstavlja sinusoidu koja je simetrična u odnosu na koordinatni sistem, kako je prikazano na sl. 5.2. Pošto je snaga obrtnog magnetnog polja srazmjerna elektromagnetnom momentu, krivulja na slici predstavlja u drugom mjerilu zavisnost $P=f(\Theta)$, odnosno pri usvojenoj pretpostavci ($P_{Cu}=0$) zavisnost $P_{em}=f(\Theta)$.



Sl. 5.2. Ugaona karakteristika elektromagnetnog momenta sinhrone mašine

Oblik krivulje $M=f(\Theta)$ uslovljen je međusobnim pomjeranjem osa simetrije magnetnih polova rotora i statora za ugao Θ. Pošto svakom opterećenju odgovara određeni ugao, nazvali smo ga ugao opterećenja, a sve naprijed pobrojane zavisnosti nazvali smo *ugaone karakteristike* sinhrone mašine.

Prema tome, stanje za ugao $\Theta=0$ nastupilo bi onda kada bi magnetno polje rotora bilo u fazi sa magnetnim poljem statora. To bi se desilo kada bi statorski namotaj bio priključen na simetričnu trofaznu mrežu, zbog čega bi se u mašini stvorilo obrtno magnetno polje, i kad bismo rotor kroz čiji namotaj teče pobudna struja potrebna da se u statoru indukuje napon $E_0=U_n$, okretali pogonskim strojem istom brzinom. Pri tome bi trebalo da se ose polova rotora poklapaju s osama obrtnog magnetnog polja. Kako je $P_{em}=M\omega=M2\pi n$, a elektromagnetni momenat $M=0$, i snaga obrtnog magnetnog polja biće jednaka nuli ($P_{em}=0$). To znači da mašina ne izmjenjuje nikakvu snagu kroz zračni zazor, ona nije ni generator ni motor, nego samo sinhrona mašina u neopterećenom radu. Pri tome ona uzima iz mreže samo snagu potrebnu za održavanje obrtnog magnetnog polja, a od pogonskog stroja samo snagu potrebnu za savladavanje mehaničkog otpora rotora mašine. Praktično to znači da snaga uzeta iz mreže pokriva gubitke u željezu mašine P_{Fe}, a snaga uzeta od pogonskog stroja mehaničke gubitke P_{meh}. Ovakvo stanje prikazano je na sl. 5.3a.



Sl. 5.3. Shematski prikaz uzajamnog djelovanja magnetskog polja rotora i magnetskog polja statora: a) pri neopterećenom radu mašine, b) kada mašina radi kao generator, c) kada mašina radi kao motor.

Povećamo li snagu dovedenu pogonskim strojem, rotor sinhrone mašine nastojaće da poveća svoju brzinu okretanja. Uslijed toga bi se povećao indukovani napon u statoru koji je do tog momenta držao ravnotežu naponu, a i smjer struje kroz stator bi se promijenio. Sinhrona mašina sada daje mreži snagu srazmjernu povećanoj snazi pogonskog stroja, i ona radi kao generator. Pri tome snaga od rotora prelazi kroz zračni zazor na stator, pa je snaga obrtnog magnetnog polja $P_{em} \neq 0$, što znači da je i elektromagnetni momenat $M \neq 0$. Promjenom smjera struje u statoru promijenio se i tok snage u njemu, odnosno ona sada ima negativan predznak. Smjer elektromagnetnog momenta biće suprotan smjeru okretanja rotora, što znači da će imati također negativan znak. Brzina okretanja rotora neće se promijeniti. On će samo za odgovarajući ugao $-\Theta$ koji odgovara proizvedenom momentu M i pripadajućoj snazi P prethoditi obrtnom magnetnom polju statora. Na sl. 5.2 ovo stanje prikazano je oznakama M' i $-\Theta'$ na dijagramu elektromagnetnog momenta sinhrone mašine.

Na sl. 5.3b. prikazan je položaj osa magnetnih polova i magnetnih silnica u zračnom zazoru, sa koje se jasno vidi da elektromagnetni momenat M djeluje u smislu smanjenja ugla Θ. Na slici je prikazana vektorska slika odnosa između indukovanog napona E_0 i struje I. U smjeru struje I djeluje magnetni napon statora.

Ako smanjimo snagu pogonskog stroja ili ga potpuno isključimo, rotor sinhrone mašine i dalje će se okretati pod uticajem obrtnog magnetnog polja statora u istom smjeru i istom brzinom kao obrtno magnetno polje. Da bi radila, sinhronoj mašini je potrebno onoliko snage iz mreže koliko joj je do sada davao pogonski stroj. Sada snaga iz mreže prelazi kroz zračni zazor na rotor, pa je snaga obrtnog magnetnog polja $P_{em} \neq 0$, što znači da je i elektromagnetni momenat $M \neq 0$.

Vidimo da je smjer snage obrtnog magnetnog polja suprotan ranijem, tj. ta snaga pa i pomoću nje proizvedeni elektromagnetni momenat M imaće isti smjer okretanja rotora, što znači da će imati pozitivan znak. Elektromagnetni momenat nije otporni ili kočeći kao pri generatorskom režimu rada sinhrone mašine, nego obrtni, pa u ovom slučaju mašina radi kao sinhroni motor.

Opteretimo li motor, doći će do smanjenja brzine okretanja njegovog rotora. Da bi motor zadržao sinhronu brzinu okretanja, on će iz mreže povući veću snagu koja će stvoriti veći elektromagnetni momenat koji će se protiviti smanjenju brzine okretanja. Pri tome će rotor za odgovarajući ugao Θ stalno zaostajati za obrtnim magnetnim poljem statora. Taj će ugao odgovarati pripadajućem elektromagnetnom momentu M. Na sl. 5.2. ovo stanje prikazano je oznakama M'' i $+\Theta''$ na dijagramu

elektromagnetnog momenta sinhrone mašine. Na sl. 5.3c. prikazan je položaj osa magnetnih polova i magnetnih silnica u zračnom zazoru, iz kojeg se jasno vidi da elektromagnetni momenat M djeluje u smislu povećanja ugla Θ. Na slici je prikazana vektorska slika odnosa između indukovanog napona E_0 i struje I.

5.1.4. Indukovani napon u jednom faznom namotaju statora sinhronog generatora

Naizmjenični napon koji se indukuje u statoru sinhronog generatora za vrijeme njegovog rada određen je veličinom, frekvencijom i oblikom krivulje.

Kod savremenih energetskih sistema oblik krivulje indukovanog napona najčešće je sinusni. Ukoliko odstupimo od toga oblika, onda kažemo da nam krivulja napona sadrži više harmonike koji štetno utiču na ukupni energetski sistem. Ta štetnost se ogleda u povećanju gubitaka i zagrijavanju u generatorima i trošilima, pojavi prenapona u prenosnim linijama, uticaju na linije slabe struje koje se nalaze u blizini itd. Iz ovih razloga proizvodnja sinusnog indukovanog napona jedan je od najvažnijih zadataka pri konstruisanju sinhronih mašina. Pri tom indukovani napon mora biti sinusnog oblika ne samo u praznom hodu nego i za vrijeme opterećenja. Koeficijent izobličenja sinusnosti krivulje napona ili struje u praznom hodu za generatore naizmjenične struje ne smije biti veći od 5% pri snazi generatora iznad 1 000 kVA, odnosno 10% pri snazi generatora između 10 i 1 000 kVA.

Veličina indukovanog napona u provodniku. Okrećući se, rotor nosi sa sobom magnetno polje čije silnice sijeku provodnike statora i u njima indukuju napon koji ima određenu frekvenciju, oblik krivulje i veličinu. Trenutna vrijednost indukovanog napona u jednom provodniku iznosi

$$e = blv \qquad \ldots\ldots (5.7)$$

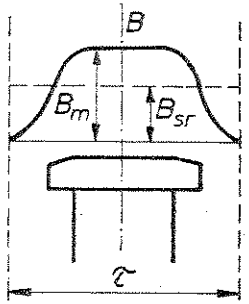
gdje je: b — trenutna vrijednost magnetne indukcije u (T)
l — aktivna dužina provodnika, tj. onaj dio njegove dužine koji je pod uticajem silnica magnetnog polja u (m)
v — obodna brzina rotora u (m/s).

Da bismo dobili efektivnu vrijednost indukovanog napona u jednom provodniku faznog namotaja, pretvorićemo površinu npr. poluperiode sinusno promjenljive magnetne indukcije u pravougaonik s jednakom površinom, kako je prikazano na sl. 5.4, pri čemu se dobije srednja vrijednost magnetne indukcije B_{sr}. Ona je manja za $2/\pi$ puta od njene maksimalne vrijednosti B_m, tj.

$$B_{sr} = (2/\pi)\, B_m.$$

Prema tome, efektivna vrijednost indukovanog napona u jednom provodniku faznog namotaja izražena preko srednje magnetne indukcije je

$$E_{ef} = B_{sr} lv \qquad \ldots\ldots (5.8)$$



Sl. 5.4. Raspodjela magnetne indukcije pod polom

Ako sada, kada znamo da je $B_m=(\pi/2)\,B_{sr}$ računamo efektivnu vrijednost preko srednje vrijednosti magnetne indukcije B_{sr}, dobićemo:

$$E_{ef}=\frac{E_m}{\sqrt{2}}=\frac{\pi}{2\sqrt{2}}B_{sr}lv.$$

Pošto je $v=\frac{\pi dn}{60}=\frac{2\pi\tau n}{60}$, imaćemo:

$$E_{ef}=\frac{B_m}{\sqrt{2}}=\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\,B_{sr}l\,\frac{2p\tau n}{60}=\frac{\pi}{\sqrt{2}}\,(B_{sr}l\tau)\,\frac{pn}{60},$$

gdje je: $l\tau=S_p$ — površina magnetnog pola, $B_{sr}S_p=\Phi$ — magnetni tok po polu i $pn/60=f$ — frekvencija.

Sređivanjem jednačine dobivamo

$$E_{ef}=2{,}22f\Phi \qquad \ldots\ldots (5.9)$$

Veličina indukovanog napona navojka, odnosno svitka. Pošto dva provodnika povezana u seriju čine navojak, a od ranije znamo da se njihovi indukovani naponi sabiraju, onda će indukovani napon po navojku biti

$$E_{nav}=2E_{ef} \qquad \ldots\ldots (5.10)$$

Više navojaka čiji se provodnici nalaze u dva utora pod suprotnim polovima čine svitak. Ako se u jednom utoru nalazi N_u provodnika (a to je i N_u navojaka u dva utora), onda je indukovani napon po jednom svitku

$$E_1=2N_uE_{ef} \qquad \ldots\ldots (5.11)$$

Veličina indukovanog napona jednog faznog namotaja. Ako namotaj rasporedimo u m utora po polu, indukovani napon n svitaka pod parom polova je

$$E_m=kmE_1=2kmN_uE_{ef}.$$

Kako mašina ima p pari polova, onda je ukupni indukovani napon

$$E=pE_m=2kpmN_uE_{ef}.$$

Uvrštavanjem u gornju jednačinu vrijednosti indukovanog napona po provodniku $E_{ef}=2{,}22f\Phi$, dobivamo:

$$E=2kpmN_u2{,}22f\Phi.$$

U ovom obrascu N_u je broj provodnika u jednom utoru; mN_u je broj provodnika namotaja jedne faze pod jednim polom, a pmN_u je ukupan broj provodnika (N) tog namotaja pod svih $2p$ polova, tj.

$$N=2pmN_u.$$

Konačno, obrazac za indukovani napon u jednom faznom namotaju je:

$$E_f=2{,}22kfN\Phi_{po} \quad \text{— (V)} \qquad \ldots\ldots (5.12)$$

gdje je:

k — ukupni navojni koeficijent namotaja statora
f — frekvencija indukovanog napona (5.2)
N — broj provodnika u jednom faznom namotaju statora
Φ_{po} — magnetni tok po polu rotora.

5.1.5. Magnetni naponi rotora i statora

Ako je sinhrona mašina sa punim rotorom opterećena, njeno magnetno kolo stvara dva obrtna magnetna napona: magnetni napon rotora (induktora) M_p i magnetni napon statora (indukta) M. Posmatraćemo samo njihove osnovne valove koji se, kako smo ranije utvrdili, okreću zajedno istom sinhronom brzinom.

Magnetni napon rotora stvara istosmjerna struja koja teče njegovim namotajem. Kod punih rotora svakom polu pripada jedan fazni namotaj sastavljen od određenog broja svitaka smještenih u utore. Maksimalnu vrijednost magnetnog napona osnovnog vala (prvi harmonik) punog rotora po paru polova određujemo prema konačnoj formuli

$$M_p=k\frac{2}{\pi}\,\frac{N_pI_p}{p} \qquad \ldots\ldots (5.13)$$

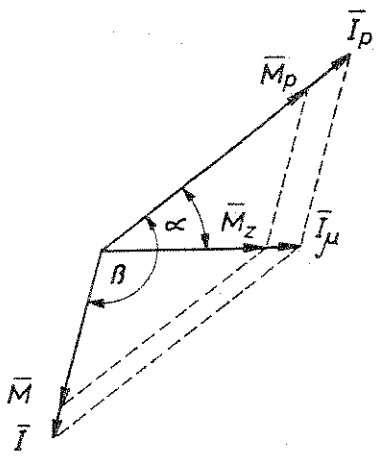
gdje je N_p ukupni broj navojaka rotora, I_p istosmjerna pobudna struja i k navojni koeficijent.

Višefazne struje koje se indukuju u namotaju statora sinhrone mašine stvaraju magnetni napon statora M. Maksimalna vrijednost njegovog osnovnog vala data je formulom

$$M=kq\,\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\,\frac{NI}{p} \qquad \ldots\ldots (5.14)$$

Istovremenim djelovanjem magnetnih napona rotora i statora M_p i M u zračnom zazoru obrazuje se zajednički magnetni tok Φ_z koji je stvoren od zajedničkog magnetnog napona M_z.

Veličinu i smjer vektora zajedničkog magnetnog napona dobićemo geometrijskim sabiranjem vektora magnetnog napona rotora i magnetnog napona statora.



Sl. 5.5. Vektorski dijagram magnetnih napona i struja sinhrone mašine

Dakle:

$$\bar{M}_z=\bar{M}_p+\bar{M} \qquad \ldots\ldots (5.15)$$

Vektorski dijagram magnetnih napona predstavljen je na sl. 5.5, gdje ugao β označava razmak između osi simetrije polova rotora i statora, a ugao α pomak

zajedničkog magnetnog napona prema magnetnom naponu rotora. Na istom dijagramu ucrtane su struje rotora I_p i statora I kao i struja magnetiziranja I_μ, koja na magnetnoj karakteristici mašine $\Phi = f(I_p)$ odgovara rezultantnom magnetnom toku.

5.1.6. **Magnetni tokovi**

Zajednički magnetni napon M_z stvara u magnetnom kolu sinhrone mašine zajednički magnetni tok Φ_z čiju vrijednost određujemo formulom

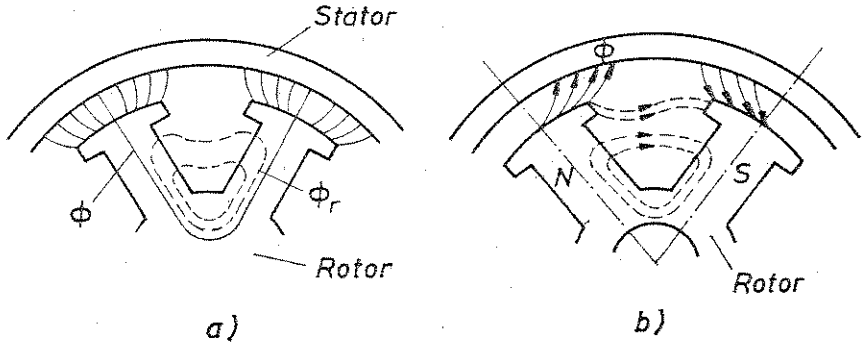
$$\Phi_z = \frac{2}{\pi} M_z \Lambda \qquad \ldots\ldots (5.16)$$

gdje je Λ magnetna provodnost koju omogućava magnetno kolo mašine zajedničkom magnetnom toku.

U dijelovima magnetnog kola sinhrone mašine, pored zajedničkog magnetnog toka, javljaju se još i magnetni tokovi rasipanja Φ_r.

Kod punog rotora magnetni tok rasipanja sastoji se od utorskog rasipanja, kako je prikazano na sl. 5.6a, i bočnog rasipanja. I jedna i druga vrsta rasipanja magnetnog toka potiču isključivo od magnetnog napona rotora M_p.

Na sl. 5.6b. prikazano je rasipanje magnetnog toka rotora čiji su magnetni polovi istaknuti. Sa slike vidimo da se ono sastoji od magnetnog rasipanja između nasuprotnih strana polnih nastavaka i polnih jezgri. Rasipanje nastaje i između bočnih površina polnih nastavaka i jezgri.



Sl. 5.6. Magnetni tokovi rasipanja: a) kod punog rotora, b) kod rotora sa istaknutim polovima

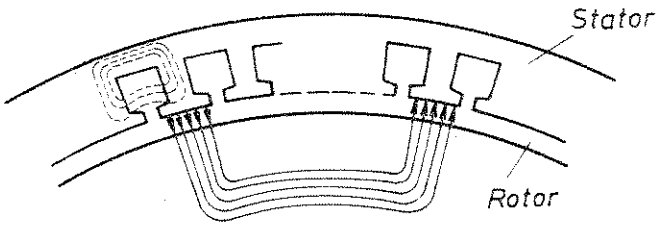
I kod statora magnetni tok rasipanja sastoji se od utorskog rasipanja, prikazanog na sl. 5.7, kao i bočnog rasipanja. I ova rasipanja potiču samo od magnetnog napona statora M.

Iz izloženog zaključujemo da u rotoru imamo dva stvarna magnetna toka: zajednički Φ_z i magnetni tok rasipanja Φ_r. Geometrijskim sabiranjem ova dva magnetna toka dobivamo rezultantni magnetni tok rotora Φ, tj.

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_z + \bar{\Phi}_r \qquad \ldots\ldots (5.17)$$

Zajednički magnetni tok Φ_z prodire i kroz jezgro statora. Pored njega u statoru nastaje i magnetni tok rasipanja Φ_r, pa će za rezultantni magnetni tok statora vrijediti jednačina:

$$\bar{\Phi} = \bar{\Phi}_z + \bar{\Phi}_r \qquad \ldots\ldots (5.18)$$



Sl. 5.7. Magnetni tokovi utorskog rasipanja statora

5.1.7. **Magnetna reakcija armature statora (indukta)**

Osnovni pojmovi. Kada pobudena sinhrona mašina nije opterećena, tj kada je u praznom hodu ($I=0$), u mašini postoji samo jedan glavni (osnovni) magnetni napon rotora i od njega stvoreno glavno (osnovno) magnetno polje $\Phi_g = \Phi_0$.

Pri opterećenom radu mašine, struja armature statora (indukta) stvara magnetni napon statora koji uzajamno djeluje sa magnetnim naponom rotora i znatno utiče na rad mašine.

Magnetni napon statora djeluje povratno na glavni magnetni napon rotora, pa se zbog toga naziva *magnetni napon reakcije statora*. Isto tako, i magnetni tok koji je nastao uslijed magnetnog napona statora naziva se *magnetni tok reakcije statora*.

Magnetna reakcija statora (indukta) zajedno sa glavnim magnetnim naponom obrazuje rezultantno magnetno polje mašine, koje se od glavnog razlikuje kako po veličini tako i po obliku krivulje polja. Naravno, to utiče i na veličinu i oblik krivulje indukovanog napona u namotaju statora. Sve ovo ima veliki uticaj na radne osobine sinhrone mašine.

Napomenimo još da ćemo pri proučavanju magnetne reakcije statora uzimati u obzir samo osnovne valove (prvi harmonik) magnetnog napona statora i rotora.

Vidjeli smo da kod mašina istosmjerne struje magnetna reakcija rotora zavisi isključivo od veličine opterećenja, kod sinhronih mašina ona zavisi i od vrste opterećanja, tj. od faznog pomaka između struje statora I i napona statora E_f ili kada se predstave kao vektori ugla ψ između vektora.

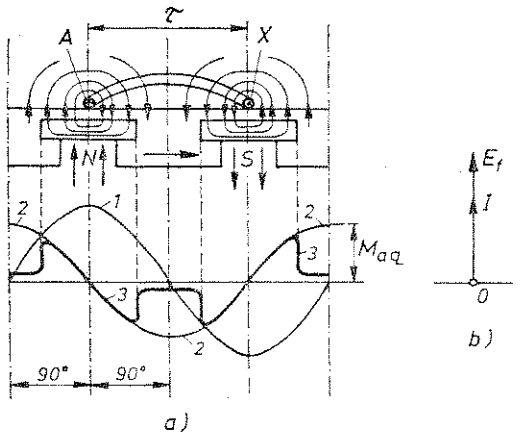
Da bismo ovu pojavu fizički objasnili, posmatraćemo tri granična slučaja.

Prvi je kada je mašina *opterećena čisto aktivnim (omskim) opterećenjem*, kod koga se struja i napon podudaraju u fazi, a ugao između njih je nula ($\psi=0$).

U drugom slučaju je *opterećenje čisto induktivno*, pri čemu struja zaostaje iza napona za ugao $\psi=\pi/2=90°$.

U trećem slučaju je *opterećenje čisto kapacitivno*, pri kome struja prednjači naponu za ugao $\psi=-\pi/2=-90°$.

Magnetna reakcija statora pri aktivnom opterećenju generatora ($\psi=0$). Pretpostavimo da je sinhroni generator doveden u normalnu brzinu okretanja, pobuđen i jednoliko opterećen. Za posmatranje odabiremo onaj momenat kada struja u jednom faznom namotaju statora postigne maksimalnu vrijednost I_m. U tom slučaju se os magnetnog napona statora podudara sa osom tog faznog namotaja. To nam omogućava da razmatranje svih triju faznih namotaja zamijenimo razmatranjima samo jednog, i to baš onog u kome je struja postigla maksimalnu vrijednost.



Sl. 5.8. Magnetna reakcija statora sinhronog generatora pri aktivnom opterećenju

Na sl. 5.8a. prikazan je samo jedan fazni namotaj i zbog jednostavnosti sastavljen od jednog svitka $A-X$.

Pri okretanju rotora njegov pobudni magnetni tok indukuje u faznom namotaju statora $A-X$ napon E_f. Vrijednost ovog napona biće maksimalna u momentu kada se aktivne strane svitka nađu u osama polova rotora. Njegov smjer određujemo pravilom desne ruke. Pri čisto aktivnom opterećenju struja u svitku I i napon E_f podudaraju se u fazi, tj. istovremeno postižu maksimalne vrijednosti, kako je prikazano na sl. 5.8b. Također vidimo da je magnetno polje stvoreno tom strujom poprečno u odnosu na glavno magnetno polje. Ono pri tom na ulazećem kraju pola slabi glavno magnetno polje, a na izlazećem ga pojačava. Ovakvo magnetno polje kao i odgovarajuću magnetnu reakciju statora nazivamo poprečnom.

Na sl. 5.8a. prikazani su osnovni valovi magnetnih napona rotora M_p (krivulja 1) i statora M (krivulja 2). Pošto je vrijednost magnetnog otpora kola rotora stalna, bez obzira na njegovu vrstu, krivulja 1 u nekom drugom mjerilu predstavlja osnovni val magnetnog toka rotora. Međutim, magnetno polje statora ovisi i o tome da li je generator s punim rotorom ili s istaknutim polovima. U prvom slučaju zračni zazor duž oboda statora svuda je isti, pa ako zanemarimo magnetni otpor željeza u odnosu na otpor zračnog zazora, možemo smatrati da krivulja 2 u nekom drugom mjerilu predstavlja magnetnu indukciju statora u zračnom zazoru. U drugom slučaju kod generatora sa rotorom istaknutih polova magnetni otpor R_m između polova znatno je veći od otpora pod polnim nastavcima. Zbog toga se u krivulji magnetne indukcije pojavljuju udubljenja (u obliku „sedla") koja odgovaraju prostoru između polova (krivulja 3 deblje izvučena). Udubljenja na krivulji 3 pokazuju da će se pod uticajem istog magnetnog napona reakcije statora javiti manji magnetni tok reakcije statora u sinhronoj mašini sa istaknutim polovima od magnetnog toka mašine sa punim rotorom.

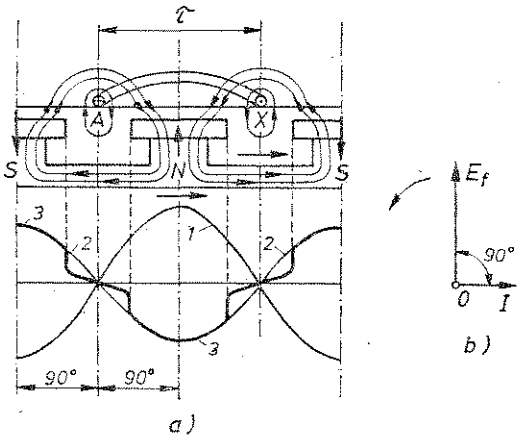
Da bismo utvrdili smanjeni magnetni tok, posmatraćemo mašinu s istaknutim polovima kao mašinu sa punim rotorom, ali sa odgovarajućim smanjenim poprečnim magnetnim naponom magnetne reakcije statora. Na sl. 5.8. neka je M_{aq} amplituda

magnetnog napona poprečne reakcije statora mašine sa punim rotorom. Tada se smanjenje tog magnetnog napona mašine sa istaknutim polovima uzima u obzir pomoću koeficijenta poprečne reakcije statora k_q:

$$M'_{aq}=k_q M_{aq} \qquad \ldots\ldots (5.19)$$

gdje je vrijednost koeficijenta $k_q=0{,}4\div 0{,}5$.

Magnetna reakcija statora pri čisto induktivnom opterećenju generatora ($\psi=90°$). Pri čisto induktivnom opterećenju struja I koja teče u svitku $A-X$ postiže svoju maksimalnu vrijednost četvrtinu periode poslije napona E_f, kako je prikazano na sl. 5.9b. Za to vrijeme rotor se zaokrene iz položaja na sl. 5.8a za 90° u smjeru njegovog okretanja. U tom slučaju os magnetnog polja statora usmjerena je suprotno osi polova, tj. pri induktivnom opterećenju sinhronog generatora djeluje uzdužna (direktna) magnetna reakcija statora koja smanjuje zajednički magnetni tok, odnosno razmagnećuje mašinu.



Sl. 5.9. Magnetna reakcija statora sinhronog generatora pri čisto induktivnom opterećenju

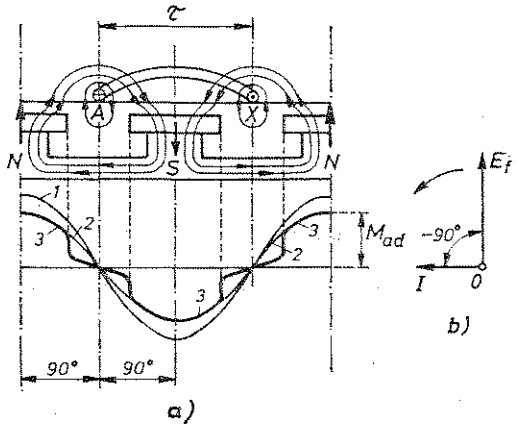
Na sl. 5.9a. prikazani su osnovni valovi magnetnih napona rotora M_p (krivulja 1) i statora M (krivulja 2). Ove krivulje u drugom mjerilu predstavljaju i osnovne valove raspodjele magnetne indukcije rotora, odnosno magnetne reakcije statora u zračnom zazoru mašine sa punim rotorom. Kod mašina sa istaknutim polovima u krivulji raspodjele magnetne indukcije pojavljuju se udubljenja (krivulja 3 deblje izvučena) i ona su manja nego pri aktivnom opterećenju. Prema tome, magnetni napon uzdužne magnetne reakcije statora kod mašine sa istaknutim polovima je:

$$M'_{ad}=k_d M_{ad} \qquad \ldots\ldots (5.20)$$

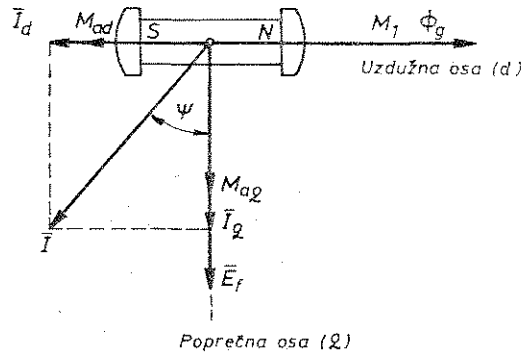
gdje je k_d koeficijent uzdužne magnetne reakcije statora čija se vrijednost kreće od 0,8 do 0,95.

Magnetna reakcija statora pri čisto kapacitivnom opterećenju generatora ($\psi=-90°$). Pri čisto kapacitivnom opterećenju struja I koja teče svitkom $A-X$ postiže svoju maksimalnu vrijednost četvrtinu periode prije napona E_f, kako je prikazano na sl. 5.10b. Za to vrijeme rotor se sa polovima zaokrene za 90° u smjeru njegovog okretanja. U tom slučaju os magnetnog polja statora usmjerena je u pravcu osi polova, tj. pri kapacitivnom opterećenju sinhronog generatora djeluje uzdužna (direktna) magnetna reakcija statora, koja povećava zajednički magnetni tok, odnosno ima magnetizirajući karakter.

Na sl. 5.10a. prikazani su osnovni valovi magnetnih napona i raspodjele magnetnih indukcija rotora i statora za slučaj kapacitivnog opterećenja.



Sl. 5.10. Magnetna reakcija statora sinhronog generatora pri čisto kapacitivnom opterećenju



Sl. 5.11. Rastavljanje struje statora, njegovog magnetnog napona na uzdužnu i poprečnu komponentu aktivno — induktivnom opterećenju sinhronog generatora

Magnetna reakcija statora pri kombinovanom opterećenju generatora. U praksi nemamo čista opterećenja nego kombinovana. U tom općem slučaju kombinovanog opterećenja struja statora I fazno je pomaknuta prema indukovanom naponu E_f za neki ugao ψ koji se nalazi u granicama od $+90°$ do $-90°$. Najčešće opterećenje sinhronog generatora je aktivno-induktivno, čiji je vektorski dijagram prikazan na sl. 5.11.

Da bismo odredili magnetnu reakciju statora, struju statora I rastavljamo u odnosu na napon E_f na aktivnu i reaktivnu komponentu.

Aktivna komponenta struje:

$$I_q = I \cos \psi \qquad \ldots\ldots (5.21)$$

predstavlja projekciju struje I na poprečnu osu, dok reaktivna komponenta struje:

$$I_d = I \sin \psi \qquad \ldots\ldots (5.22)$$

predstavlja projekciju struje I na uzdužnu osu.

Struja I_q stvara magnetni napon poprečne reakcije statora ($M_{aq} = M_a \cos \psi$), koji kod sinhronog generatora na ulazećem kraju pola slabi glavno magnetno polje, a na izlazećem ga pojačava.

Struja I_d stvara magnetni napon uzdužne reakcije statora ($M_{ad} = M_a \sin \psi$), koji u našem slučaju razmagnećuje mašinu.

Ako se radi o mašini s istaknutim polovima i uz primjenu dijagrama na sl. 5.11. dobivamo:

$$M_{aq} = k_q M_a \cos \psi, \qquad \ldots\ldots (5.23)$$

$$M_{ad} = k_d M_a \sin \psi. \qquad \ldots\ldots (5.24)$$

Kod mašina sa punim rotorom imamo da je $k_q = k_d = 1$

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

1. Koji značaj imaju sinhroni generatori u elektroprivredi?
2. Koje jedinice snage sinhronih generatora se danas upotrebljavaju u elektranama?
3. Objasni način rada trofaznog sinhronog generatora!
4. Pomoću ugaone karakteristike elektromagnetnog momenta objasni generatorski i motorski režim rada sinhrone mašine!
5. Kako dolazimo do obrasca za indukovani napon u jednom faznom namotaju statora sinhronog generatora?
6. Kako nastaje magnetna reakcija armature statora? Uporedi je sa magnetnom reakcijom kod mašina istosmjerne struje!
7. Objasni magnetnu reakciju statora pri čisto induktivnom opterećenju!

5.2. KONSTRUKTIVNA IZVEDBA SINHRONIH GENERATORA

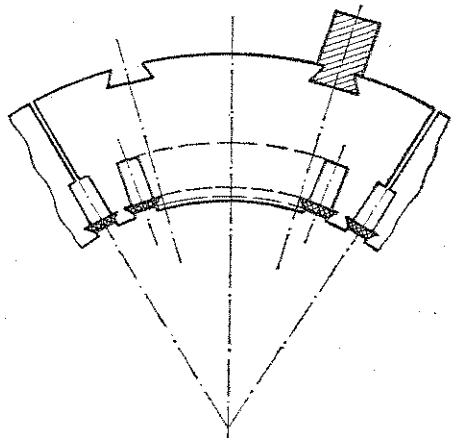
Svaka električna mašina pa i sinhrona može da radi i kao generator i kao motor. Međutim, kada se govori o sinhronim mašinama, onda se prvenstveno misli na generatore, jer s obzirom na vrijednost instalisanih snaga, daleko je veća upotreba sinhronih mašina kada rade u ulozi generatora.

Magnetno kolo sinhronih generatora sastoji se, kao i kod svih rotacionih mašina, iz dva osnovna dijela: nepokretnog dijela ili statora i obrtnog dijela ili rotora, koji su međusobno razdvojeni zračnim zazorom. Kod sinhronih mašina induktor (ili primar) je uvijek rotor, a indukt (ili sekundar) je stator.

5.2.1. Stator

Sastoji se od tri dijela: kućišta, jezgra i namotaja. O ovome smo vrlo opširno govorili kada smo obrađivali konstrukciju asinhronih motora, i zato ćemo se ovdje zadržati samo na onome što je karakteristično za konstrukciju sinhronih generatora većih nominalnih snaga.

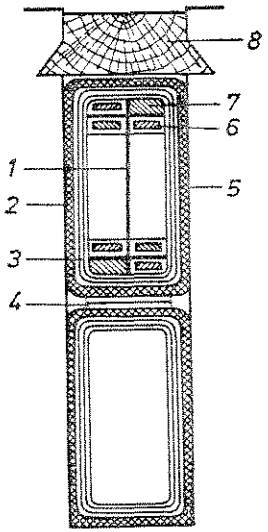
Jezgra statora sastavljena je od dinamo-limova debljine 0,5 do 1 mm. Ovi limovi su međusobno izolovani tankim papirom ili slojem laka s ciljem smanjenja gubitaka usljed vrtložnih struja. Pošto se ovdje radi o velikim snagama, onda u zavisnosti od brzine okretanja rotora prečnik rotora, a time i unutrašnji prečnik statora kreću se u širokim granicama. Tako, na primjer, za brzinu rotora od 3 000 °/min, tj. kod dvopolnih mašina prečnik ro-



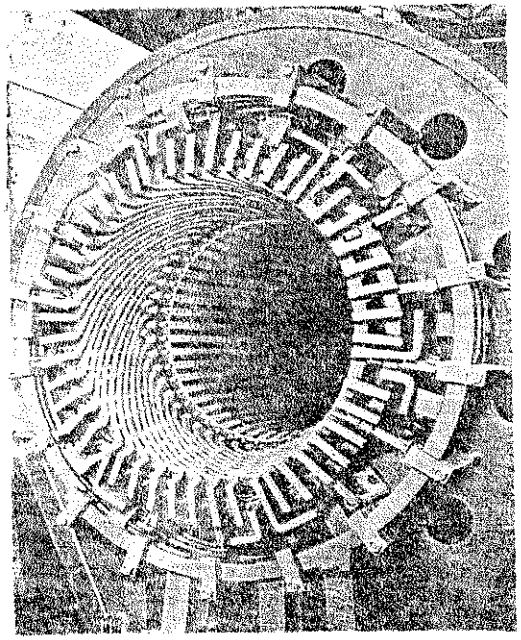
Sl. 5.12. Dinamo-lim kao dio (isječak) kružnog prstena jezgre statora

tora je nešto veći od 1 m. Kod sinhronih mašina vrlo malih brzina, tj. s velikim brojem polova unutrašnji prečnik statora ide i do 15 m. Kod svih ovih statora jasno je da jedan sloj u paketu limova ne može biti od jednog komada, već se sastoji od većeg broja dijelova kružnog prstena. Jedan takav lim kao dio kružnog prstena prikazan je na sl. 5.12. Po vanjskom obodu nalaze se izrezi u obliku lastinog repa, koji dolaze u vodice što se nalaze na kućištu, a s ciljem mehaničkog učvršćivanja limova, odnosno statora kao dijela magnetnog kola. Limovi statora se slažu u pakete dužine 40 do 50 mm, između kojih se po osnoj dužini ostavljaju ventilacioni kanali dužine oko 10 mm s ciljem boljeg hlađenja.

Utori statora sinhronih mašina manjih snaga su poluzatvoreni, a oni većih i velikih snaga (počev od 5 000 kVA) su uvijek otvoreni i pravougaoni. U utore



Sl. 5.13. Utor statora sa uloženim namotajem: 1 — mikanit, 2 — azbestna traka, 3 — mikanitna traka, 4 — vlaknasta podloga, 5 — azbest, 6 — provodnik, 7 — azbestna masa, 8 — klin.



Sl. 5.14. Prednji izgled statora sinhronog generatora s horizontalnim položajem osovine

se stavljaju namotaji. Kod sinhronih mašina manjih snaga namotaji su od provodnika okruglog presjeka, dok se kod mašina većih snaga u otvorene utore stavljaju štapovi. Na sl. 5.13. prikazan je jedan otvoreni utor sa uloženim namotajem za visoki napon. Čitav stator sa namotajima sličan je statoru asinhronog motora. Na sl. 5.14. prikazan je izgled prednjeg dijela statora s horizontalnim položajem osovine na kojoj se vide bočni dijelovi dvoslojnog štapnog namotaja.

5.2.1. **Rotor**

Rotor je pobudni dio sinhrone mašine. Na njemu je smješten pobudni namotaj kojim teče istosmjerna struja koja stvara magnetni tok.

U zavisnosti od konstrukcije rotora, sinhrone generatore dijelimo na dvije vrste:

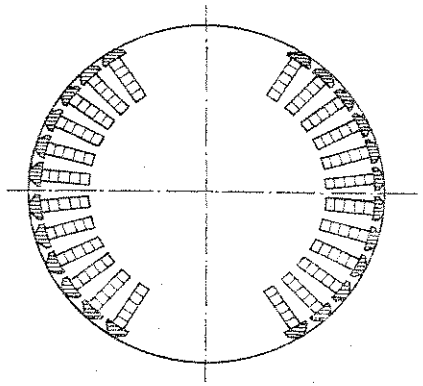
— generatore sa *punim (valjkastim) rotorom* i

— generatore sa *istaknutim polovima.*

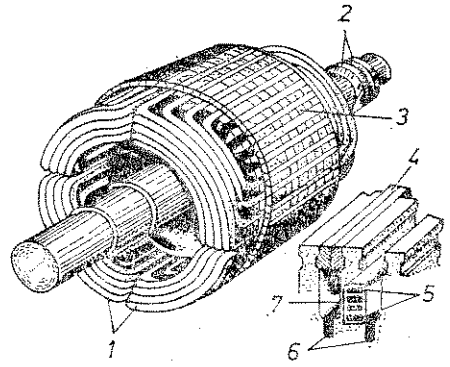
Ove dvije vrste sinhronih mašina vezuju se za brzinu okretanja rotora. Naime, za frekvenciju od 50 Hz pri broju pari polova $p=2$ brzine okretanja su $n=3000^{o}$/min i $n=1500^{o}$/min. Uslijed velikih brzina dolazi i do velikih mehaničkih naprezanja. To nalaže da se ne ide na velike prečnike rotora i da se namotaj raspoređuje što ravnomjernije po obodu rotora. Za ovako velike brzine kao pogonski strojevi služe parne turbine. Zato se *sinhroni generatori sa punim rotorom* nazivaju i *turbogeneratori.*

Kada se prelazi na veći broj pari polova, brzina okretanja se smanjuje. Što je manja brzina okretanja dopušta se veći prečnik rotora, naravno, ograničen mehaničkim naprezanjima uslijed djelovanja centrifugalnih sila. Ova mehanička naprezanja su tolika da se ne zahtijeva ravnomjerna raspodjela namotaja po obodu rotora, pa se onda prelazi na rotor sa istaknutim polovima. Sporohodni pogonski strojevi su vodene turbine i otuda se *sinhroni generatori sa istaknutim polovima* nazivaju i *hidrogeneratori.*

Puni (valjkasti) rotor. Snaga sinhronih mašina sa punim rotorom kreće se u vrlo širokim razmjerama, od 1 MVA pa do 1 000 MVA, koliko danas iznose snage najvećih generatora u termoelektranama. Puni rotori, a to znači i turbogeneratori postavljaju se uvijek horizontalno. Uslijed velikih brzina okretanja, velikih obodnih brzina rotora i velikih mehaničkih naprezanja, rotor turbogeneratora izrađuje se od najkvalitetnijeg masivnog čelika. Za velike mašine upotrebljava se hromniklmolibdenski čelik, specijalno termički i mehanički obrađen. Čitavom



Sl. 5.15. Poprečni presjek punog rotora

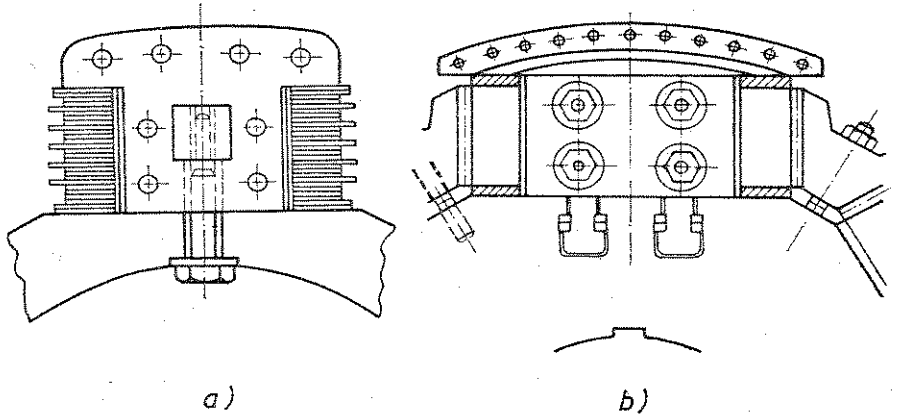


Sl. 5.16. Puni (valjkasti) rotor: 1 — pobudni namotaj, 2 — klizni prstenovi, 3 — pol, 4 — klin, 5 — provodnici pobudnog namotaja, 6 — ventilacioni kanali, 7 — izolacija.

osnom dužinom rotora urezuju se utori pomoću glodalice i zatvaraju se čeličnim vijčanim klinom. Na sl. 5.15. prikazan je poprečni presjek jednog takvog rotora koji je obrađen na glodalici. U utore čiji oblik je prikazan na slici smještaju se namotaji. Oni se izrađuju od bakra koji pri radnoj temperaturi, pored velike električne provodnosti, ima i visoku mehaničku čvrstoću. Svici se izrađuju od provodnika pravougaonog presjeka. Zbog mehaničkih naprezanja koja nastaju pod uticajem centrifugalnih sila, namotaj rotora se mora dobro učvrstiti. Iz tog razloga su klinovi izrađeni od nemagnetnog čelika ili od aluminijske legure.

Puni rotor sa ugrađenim namotajima prikazan je na sl. 5.16. Na slici je također predstavljen dio rotora (utor, provodnici, izolacija, ventilacioni kanali i dr.).

Rotor s istaknutim polovima. Snaga sinhronih mašina sa istaknutim polovima kreće se od 20 kVA pa naviše kada se upotrebljavaju kao rezervni agregati u važnijim javnim zgradama, bolnicama i dr., pa do oko 200 MVA, koliko danas iznose snage najvećih generatora u hidroelektranama. Rotor sa istaknutim polovima sastoji se od osovine, magnetnog jarma i magnetnih polova. Za mašine manjih snaga i većih brzina rotor sa istaknutim polovima izrađuje se tako da se na magnetni vijenac koji može da čini jednu cjelinu sa osovinom postavljaju magnetni polovi. Oni se pričvršćuju za magnetni vijenac pomoću zavrtanja kod mašina manjih snaga i manjih brzina ili pomoću „lastinog repa" kod mašina većih snaga i većih brzina. Na sl. 5.17a. prikazan je magnetni pol pričvršćen za magnetni vijenac pomoću zavrtanja, a na sl. 5.17b. pomoću lastinog repa. Magnetni pol sastavljen je od dinamo-limova debljine 0,5 do 2 mm. Paketi limova spajaju se zavrtnjima.

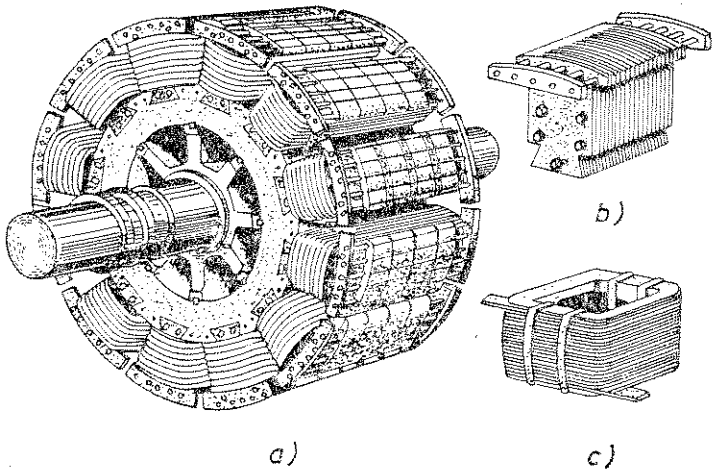


Sl. 5.17. Pričvršćenje magnetnog pola za magnetni jaram: a) pomoću zavrtnja, b) pomoću lastinog repa.

Na jezgro magnetnih polova smještaju se pobudni namotaji. Kod mašina manjih i srednjih snaga izrađuju se od izolovanih provodnika četvrtastog presjeka. Klasa izolacije zavisi od usvojene radne temperature.

Na polnim nastavcima se kod nekih mašina nalaze okrugli utori kroz koje provlačimo bakrene ili mesingane provodnike, a koji se s obje bočne strane kratko spajaju pomoću prstenova. Tako se dobije posebni namotaj na rotoru sličan kavezu

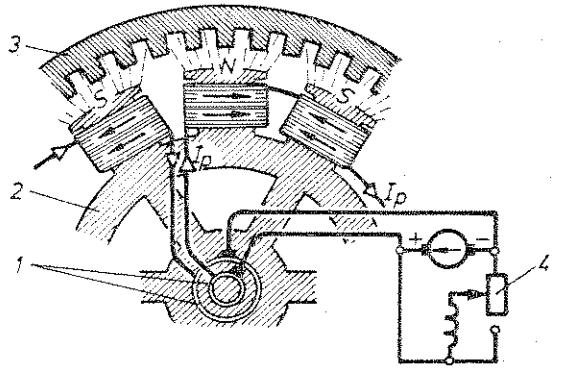
kod asinhronih motora sa rotorom u kratkom spoju, koji se ovdje naziva *prigušni namotaj* ili *Leblancev amortizer*. On ima više funkcija, a najvažnija je da prigušuje djelovanje viših harmonika. Kod jednofaznog generatora on prigušuje i djelovanje inverznog magnetnog polja. Kod sinhronih motora služi za puštanje u rad i dovođenje ih u sinhronu brzinu. Na sl. 5.18. prikazan je rotor sa istaknutim polovima generatora manje snage.



Sl. 5.18. Rotor sa istaknutim polovima: a) vanjski izgled, b) pol sa prigušnim kavezom, c) namotaj pola.

Krajevi pobudnog namotaja, slično kao kod punih rotora, izvode se na dva klizna prstena postavljena na osovinu s jedne bočne strane magnetnog kola rotora, kako je prikazano na sl. 5.19. Na klizne prstenove naliježu ugljene četkice preko kojih se dovodi istosmjerna pobudna struja iz generatora istosmjerne struje.

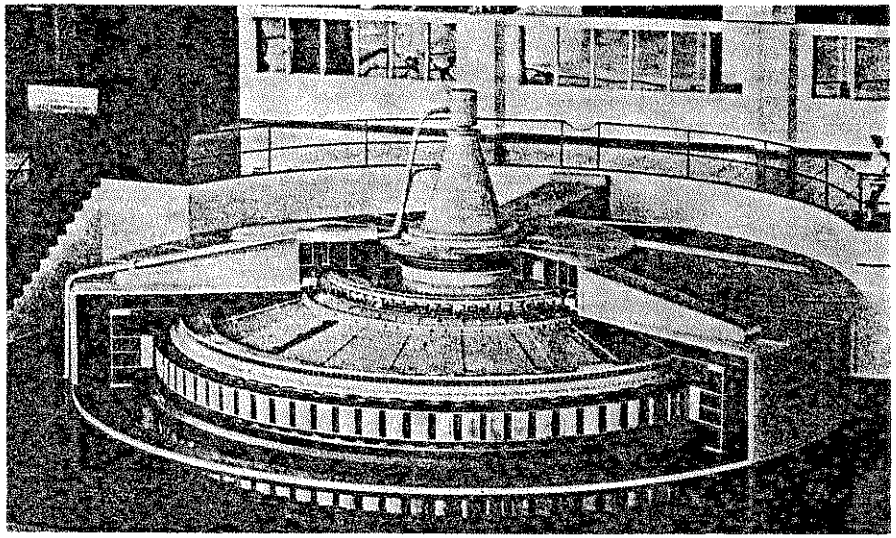
Za razliku od punih rotora, rotori sa istaknutim polovima, a time i hidrogeneratori mogu da se postavljaju i horizontalno i vertikalno. Svi sinhroni generatori čiji su rotori sa istaknutim polovima, čiji je pogonski stroj motor s unutrašnjim sagorijevanjem ili vodena tur-



Sl. 5.19. Shematski prikaz pobudivanja sinhronog generatora: 1 — klizni prstenovi, 2 — rotor, 3 — stator, 4 — regulacioni otpornik.

bina čija je brzina okretanja relativno velika (iznad 200°/min, npr. Peltonova turbina) postavljaju se horizontalno.

Generatori većih snaga, čija je brzina okretanja relativno manja, postavljaju se vertikalno. Presjek jednog takvog hidrogeneratora prikazan je na sl. 5.20. Ispod generatora se nalazi vodena turbina (npr. Kaplanova turbina) čije su osovine povezane spojnicama.



Sl. 5.20. Presjek hidrogeneratora snage 28 MVA, brzine okretanja 68,2 °/min i napona 6,6 kV

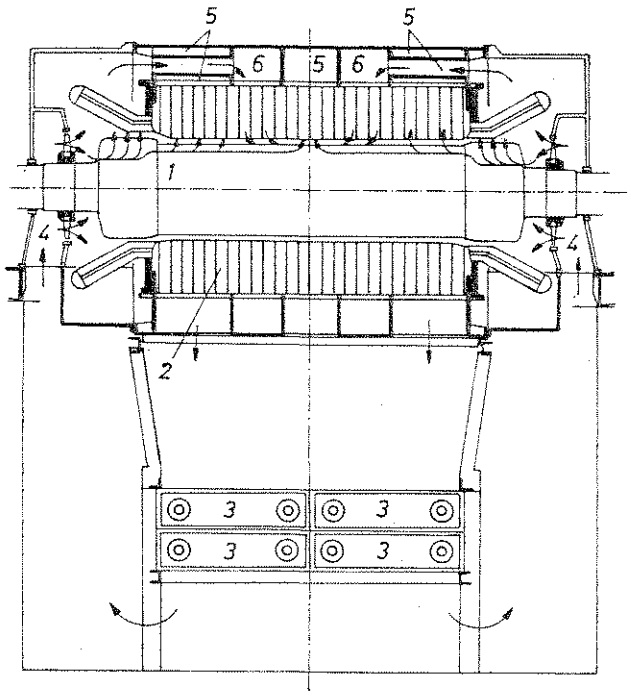
U konstruktivnom pogledu, odnosno u pogledu dimenzija, turbogeneratori i hidrogeneratori se veoma razlikuju. Tako npr. kod turbogeneratora snage 100 i 200 MVA dužina rotora je 5 do 6 puta veća od prečnika. Međutim, kod hidrogeneratora snage 100 do 130 MVA prečnik rotora je 6 do 7 puta veći od osne dužine magnetnog kola.

5.2.3. **Hlađenje sinhronih generatora**

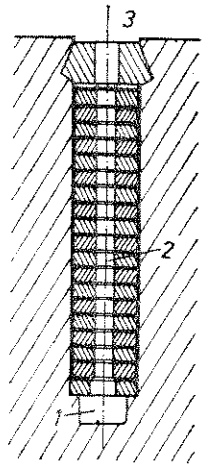
Sinhroni generatori sa istaknutim polovima svih snaga i generatori s punim rotorom malih i srednjih snaga hlade se isključivo vazduhom. Mali su generatori obično otvoreni, te se rashladni vazduh uzima iz strojarnice i opet u nju vraća. Kod generatora većih snaga kolo rashladnog vazduha obično je zatvoreno. Vazduh koji se u mašini zagrijao indirektno se hladi vodom u hladnjacima, a zatim ponovo vraća u mašinu. Cirkulaciju vazduha proizvode ventilatori smješteni na rotoru, dok su hladnjaci ugrađeni na kućištu mašine. Ovakav način hlađenja sprečava prodiranje prljavštine u mašinu, a omogućuje jednostavnu ugradnju uređaja za gašenje požara (ugljičnim dioksidom i dr.).

Kod generatora sa istaknutim polovima struja rashladnog vazduha prolazi najprije između polova odnoseći toplotu sa polnog namotaja, zatim ulazi u stator

i prolazi kroz ventilacione kanale statora, gdje hladi paket i namotaj statora. Zagrijani vazduh se potom hladi u hladnjacima i ponovo vraća u mašinu. Na svom dugom putu kroz mašinu rashladni vazduh se zagrijava, pa je očito da će temperatura u sredini mašine biti veća nego na krajevima. Zbog toga se kod turbogeneratora, kod kojih je dužina rotora razmjerno velika prema njegovom prečniku, primjenjuje tzv. sekcijsko hlađenje. Naime, kućište statora podijeljeno je na nekoliko sekcija. Jedan dio ovih sekcija služi za dovođenje hladnog, a drugi dio za odvođenje zagrijanog vazduha. Na sl. 5.21. prikazan je rashladni sistem sa pet sekcija.



Sl. 5.21. Rashladni sistem turbogeneratora sa pet sekcija: 1 — rotor, 2 — statorski paket, 3 — hladnjaci, 4 — sekcija toplog vazduha, 5 — sekcija hladnog vazduha.

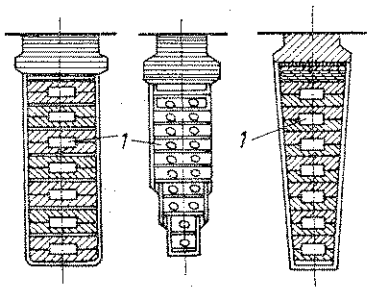


Sl. 5.22. Hlađenje pobudnog namotaja vazduhom koji struji kroz utore turbogeneratora: 1 — kanal za vazduh ispod utora, 2 — otvori u rotorskom namotaju, 3 — zračni zazor.

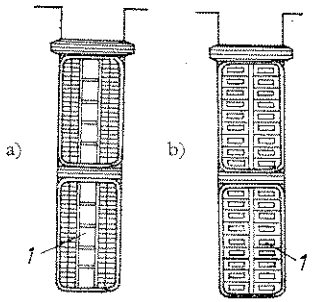
Rotor turbogeneratora može se hladiti preko vanjske površine, koja može biti povećana ventilacionim kanalima, otvorima u zubima rotora ili pomoću još jedne struje vazduha koja se dovodi kroz poseban kanal 1 ispod utora i koja prolazi kroz otvore 2 u rotorskom namotaju i odatle izlazi u zračni zazor 3, kako je to prikazano na sl. 5.22.

Pošto je prečnik rotora turbogeneratora ograničen mehaničkim naprezanjima (pri brzini od 3 000°/min najveći mogući prečnik je približno 1 150 m), i prostor za smještaj pobudnog namotaja je ograničen i određen. Dopuštenim zagrijavanjem pobudnog namotaja određena je ukupna pobuda, a time i snaga mašine po jedinici dužine. Iz mehaničkih razloga i dužina mašine je ograničena i jedino sredstvo za

povećanje snage je uvođenje efikasnijeg sistema hlađenja. Umjesto vazduha, kao sredstvo za hlađenje se uzima vodik, čime se smanjuju gubici uslijed trenja i ventilacije (u omjeru specifičnih masa), a hlađenje je bolje i zbog većeg koeficijenta prelaza toplote i veće toplotne vodljivosti vodika. Nadalje, mala gustina vodika omogućuje lagan prolaz kroz vrlo uske ventilacione kanale, što dovodi do tzv. direktnog hlađenja provodnika (direktni kontakt rashladnog plina sa izvorom to-



Sl. 5.23. Oblici rotorskih utora s direktnim hlađenjem provodnika: 1 — kanali za prolaz rashladnog plina



Sl. 5.24. Utori statora s direktnim hlađenjem: a) vodikom, b) vodom, 1 — kanali za prolaz rashladnog sredstva.

plote). Na sl. 5.23. prikazano je nekoliko rotorskih utora s direktnim hlađenjem provodnika. Dalje poboljšanje hlađenja postiže se uvođenjem hlađenja tečnošću (najčešće omekšanom vodom). Izvedba takvih rashladnih sistema povezana je s velikim tehnološkim teškoćama, pa se oni primjenjuju samo za najveće jedinice. Uvođenjem direktnog hlađenja provodnika rotora turbogeneratora vodikom naglo je porasla jedinična snaga, uslijed čega je nastao problem hlađenja statora. Zbog toga je u statoru također uvedeno direktno hlađenje provodnika, i to vodikom ili vodom. Na sl. 5.24. prikazani su utori statora s direktnim hlađenjem provodnika vodikom i vodom.

Hlađenje turbogeneratora vodikom bitno utiče na izvedbu mašine. Mješavina vazduha i vodika eksplozivna je između 5 i 75% (zapreminskih) vodika u vazduhu, pa kućište mora biti nepropustljivo za vodik. Da bi se izbjegla opasnost od eksplozije plin se u generatoru održava na približno 98% čistoće vodika, no, i pored toga, kućište se izraduje tako da može izdržati 1 000 kPa predpritiska kako bi se izbjegle štetne posljedice eventualne eksplozije.

Pošto se u posljednje vrijeme i hidrogeneratori grade sa većom snagom (500 MW i više), hlađenje statorskog i rotorskog namotaja vrši se vodom.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Od kojih dijelova se sastoji sinhroni generator?
2. Kako je konstruktivno izveden stator?
3. Kakav oblik može imati rotor sinhronog generatora?
4. S obzirom na izvedbu rotora, kako dijelimo sinhrone generatore?
5. Kakve sisteme hlađenja imamo kod sinhronih generatora i koja sredstva upotrebljavamo za hlađenje?

5.3. VEKTORSKI DIJAGRAMI I KARAKTERISTIKE SINHRONIH GENERATORA

5.3.1. Promjena napona pri opterećenju sinhronog generatora

Pri svakoj promjeni opterećenja sinhronog generatora, na njegovim krajevima nastaje promjena napona jedne od najznačajnijih veličina koja određuje njegov rad. Pri stalnoj brzini okretanja generatora (n=const.) i stalnoj struji njegove pobude (I_p=const.), napon se mijenja pod uticajem:

— magnetne reakcije statora uslijed koje se mijenja glavni magnetni tok mašine,

— rasipanja magnetnog toka u statoru i

— aktivnog otpora namotaja statora.

Ovaj posljednji uzrok u usporedbi sa prva dva ima vrlo malu vrijednost, pa ga možemo zanemariti.

Pod normalnom promjenom napona podrazumijevamo promjenu napona na krajevima sinhronog generatora ΔU_n pri prelazu od nominalnog opterećenja na prazan hod, uz uslov da brzina okretanja mašine i njena pobudna struja ostaju nepromijenjeni.

Dakle:

$$\Delta U_n = U_0 - U_n \qquad \ldots\ldots (5.25)$$

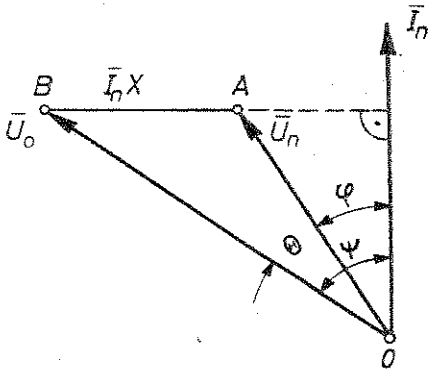
Promjena napona obično se izražava u postocima u odnosu na nominalni napon i tako dobivamo relativnu promjenu napona Δu_n:

$$\Delta u_n(\%) = \frac{\Delta U}{U_n} 100 = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100 \qquad \ldots\ldots (5.26)$$

Do vrijednosti promjene napona sinhronog generatora najjednostavnije ćemo doći pomoću vektorskih dijagrama. Iako oni pokazuju samo prve harmonike promjenljivih veličina i ne daju savršeno tačnu sliku promjene napona, ipak se redovno upotrebljavaju, jer daju rezultate koji se gotovo podudaraju sa stvarnim.

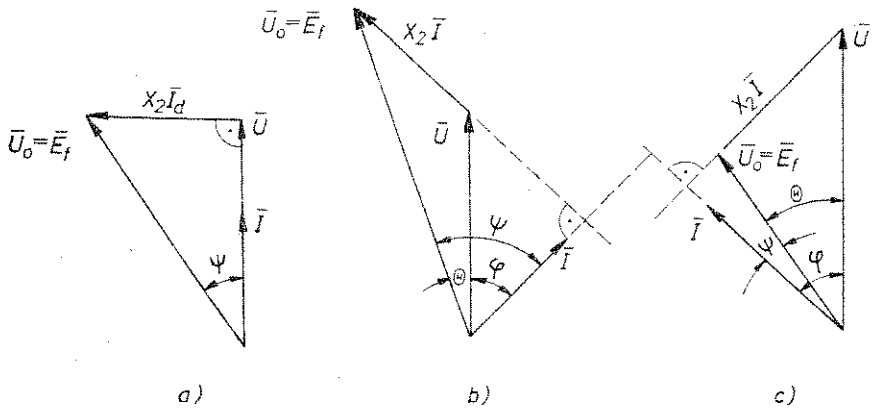
U pojednostavljenom dijagramu koristimo se sinhronom reaktancijom (induktivnim otporom) X mašine. Ako generator radi uz nominalno opterećenje, a reaktancija X je poznata, onda se konstrukcija vektorskog dijagrama napona izvodi na vrlo jednostavan način, kako je prikazano na sl. 5.25. Pod uglom φ prema vektoru struje I_n crtamo vektor nominalnog napona $OA = U_n$, a zatim okomito na vektor struje I_n povlačimo iz tačke A vektor $AB = I_n X$. Tada je:

$$U_0 = OB \quad \text{i} \quad \Delta u = \frac{U_0 - U_n}{U_n}$$



Sl. 5.25. Pojednostavljeni vektorski dijagram napona

Na sl. 5.26. prikazani su pojednostavljeni vektorski dijagrami napona sinhronog generatora sa punim rotorom za tri karakteristična slučaja:



Sl. 5.26. Pojednostavljeni vektorski dijagram napona sinhronog generatora sa punim rotorom a) pri čisto aktivnom opterećenju $\varphi=0$, b) pri aktivno — induktivnom opterećenju $\varphi>0$, c) pr aktivno — kapacitivnom opterećenju $\varphi<0$.

a) kada je struja opterećenja u fazi sa naponom ($\varphi=0$), tj. kada je generator opterećen čisto aktivno,

b) kada struja opterećenja zaostaje za naponom ($\varphi>0$), odnosno kada je generator opterećen aktivno-induktivno i

c) kada struja opterećenja prethodi naponu ($\varphi<0$), tj. kada je opterećenje generatora aktivno-kapacitivno.

U prva dva slučaja $U_0>U_2$, pa se pri povećanju opterećenja napon generatora smanjuje. U trećem slučaju $U_0<U_2$, tj. napon generatora raste sa povećanjem opterećenja. To se objašnjava time što pri aktivno-kapacitivnom opterećenju uzdužna (direktna) komponenta magnetne reakcije statora magnetiše mašinu, dok je u prva dva slučaja razmagnećuje.

5.3.2. **Uopšte o karakteristikama sinhronog generatora**

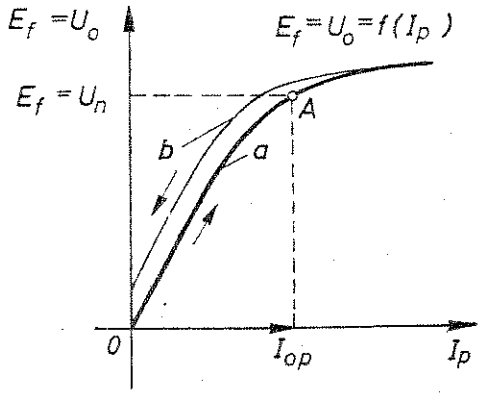
To su krivulje koje se mogu dobiti pri ustaljenom radnom stanju sinhronog generatora kao međusobne zavisnosti onih veličina koje mogu da se mijenjaju kao npr. indukovani napon, napon, pobudna struja, struja statora itd. Ako odaberemo takve zavisnosti, grafički predstavljene krivuljama, koje imaju i praktičnu primjenu, onda ih nazivamo *karakteristike sinhronih generatora*. U najvažnije karakteristike sinhronog generatora spadaju: *karakteristika praznog hoda*, *vanjska karakteristika* i *karakteristika regulacije*. Zbog njihove važnosti i praktične primjene, svaku od njih ćemo posebno razmotriti.

5.3.3. **Karakteristika praznog hoda**

To je krivulja koja pokazuje kako se mijenja indukovani napon E_f neopterećenog sinhronog generatora ($I=0$), zavisno od pubudne struje I_p:

$$E_f=U_0=f(I_p) \text{ pri } f=\text{const. } (n=\text{const.}) \quad \ldots\ldots \quad (5.27)$$

Snimanje ove karakteristike izvodi se praktično isto kao i kod generatora istosmjerne struje. Pokusom, mijenjajući pobudnu struju generatora, dobićemo krivulju koja se sastoji od uzlazne krive (*a*) dobijene pri povećanju pobudne struje i silazne krive (*b*) koja se dobije pri smanjenju struje pobude, kako je prikazano na sl. 5.27. Što se krivulja pri smanjenju struje pobude ne vraća istim putem objašnjava se postojanjem zaostalog magnetizma u magnetnom kolu mašine. Kao karakteristika praznog hoda upotrebljava se uzlazna kriva. Nominalni režim rada sinhronog generatora približno odgovara koljenu uzlazne krive (tačka *A*).



Sl. 5.27. Karakteristika praznog hoda sinhronog generatora

5.3.4. **Vanjska karakteristika**

To je krivulja koja pokazuje kako se mijenja napon na krajevima generatora U pri promjeni struje opterećenja I, pri stalnoj pobudnoj struji, pri stalnoj brzini okretanja i pri stalnom faktoru snage, tj.:

$$U=f(I) \quad \text{pri } I_p=\text{const., } n=\text{const. i } \cos\varphi=\text{const.} \quad \ldots\ldots \quad (5.28)$$

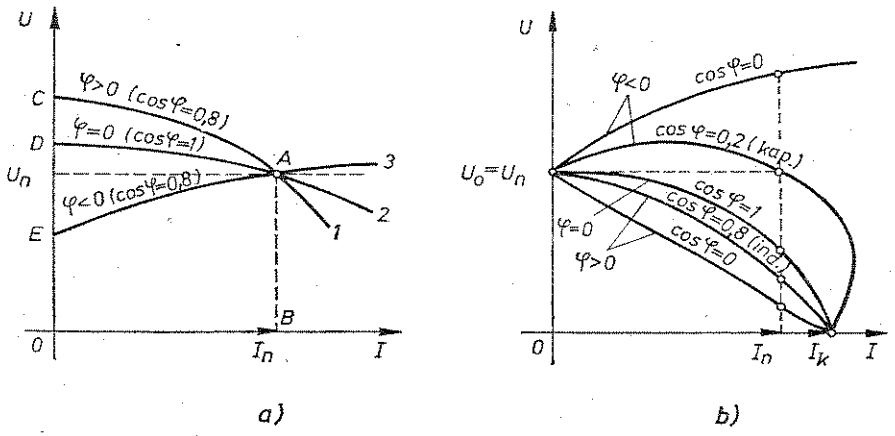
Oblik vanjske karakteristike zavisi od vrste opterećenja, tj. od ugla φ između vektora U i I. Na sl. 5.28. prikazane su vanjske karakteristike pri različitim vrstama opterećenja generatora za dva posebna slučaja:

a) kada im je tačka $A(U_n, I_n)$ zajednička i

b) kada su tačke dobijene za jednu istu vrijednost struje pobude, tj. za isti napon praznog hoda U_0.

U prvom slučaju, vanjska karakteristika snimljena uz promjenu opterećenja generatora od nominalnog (pri induktivnom opterećenju $\cos\varphi=0{,}8$) do nule (krivulja 1 sl. 5.28a) ima važnu praktičnu vrijednost. Struju pobude koja odgovara nominalnom režimu rada nazivamo nominalnom strujom pobude I_{pn}. Sa slike lako uočavamo da smanjenjem opterećenja napon U vrlo brzo raste, tako da se pri

tome sve više smanjuje razmagnetizirajuće djelovanje reakcije statora kao i pad napona u induktivnom otporu rasipanja. Pri neopterećenom generatoru $U_0=OC$, pa je:



Sl. 5.28. Vanjske karakteristike sinhronog generatora pri različitim vrstama opterećenja

$$\Delta u=\frac{OC-BA}{BA}.$$

Na istoj slici prikazane su još dvije vanjske karakteristike (kruvulje 2 i 3) snimane pri $\cos\varphi=1$ i $\cos(-\varphi)=0{,}8$. Promjena napona po krivulji 2 manja je nego po krivulji 1, jer je pri aktivnom opterećenju reakcija statora koja uzdužno magnetizira vrlo mala. Pri kapacitivnom opterećenju postoji reakcija statora koja uzdužno magnetizira, zbog čega je vrijednost promjene napona negativna. Dakle:

$$\Delta u=\frac{OE-BA}{BA}$$

Obično generatori rade sa $\cos\varphi=0{,}9\div0{,}85$ i sa strujom opterećenja koja zaostaje iza napona. U tom slučaju pad napona je 25 do 35%.

U drugom slučaju najprije podešavamo struju pobude pri praznom hodu dok ne dobijemo da je indukovani napon jednak nominalnom naponu ($U_0=U_n$). Nakon toga generator opterećujemo sve većom strujom, pri stalnom faktoru snage, uslijed čega napon sve više opada. Opadanje se produžava do vrijednosti napona jednakog nuli, čime se prelazi u ustaljeno stanje kratkog spoja ($I=I_k$). Za svaki faktor snage dobija se druga vanjska karakteristika. Ukoliko je faktor snage lošiji, promjena napona je za istu struju opterećenja veća. Međutim, ukoliko je opterećenje kapacitivno, napon se povećava povećanjem kapacitivnog opterećenja. Oblici vanjskih karakteristika za razne faktore snage prikazane su na sl. 5.28b. Snimanje vanjskih karakteristika može se početi od tolike vrijednosti napona praznog hoda U_0 da se pri određenom faktoru snage, a pri nominalnom opterećenju I_n ima nominalni napon U_n.

5.3.5. **Karakteristika regulacije**

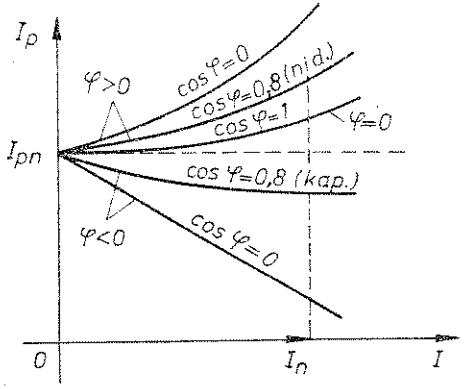
Karakteristika regulacije (ili karakteristika pobudne struje) je krivulja koja pokazuje kako se mora mijenjati pobudna struja I_p zavisno od struje opterećenja I, pri nominalnoj brzini okretanja ($n=n_n=$const.) i stalnom faktoru snage ($\cos\varphi=$ =const.) da bi se na krajevima generatora održavao stalan napon ($U=$const.).

$$I_p=f(I) \quad \text{pri } n=n_n=\text{const.},\ \cos\varphi=\text{const. i } U=\text{const.} \quad \ldots\ldots \quad (5.29)$$

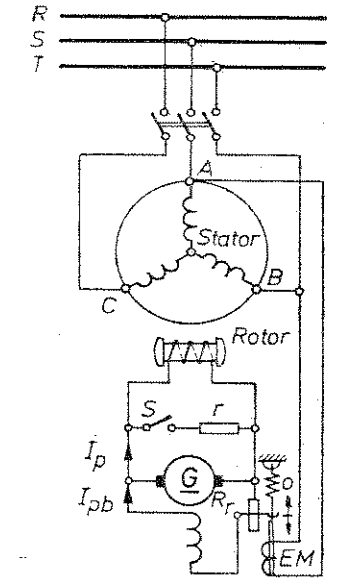
Da bi se snimala karakteristika regulacije generatora, najprije se pri praznom hodu mašine podesi struja pobude I_{pn}, pri kojoj se na krajevima mašine dobije nominalni napon ($U_0=U_n$). Nakon toga se generator optereti nekim opterećenjem pri određenom faktoru snage, uslijed čega napon opadne. Pobudnu struju povećavamo dok napon opet ne postigne nominalnu vrijednost.

Na sl. 5.29. prikazani su opšti izgledi (oblici) karakteristika regulacije pri raznim vrstama opterećenja. One pokazuju da je za održanje stalnog napona pri povećanju opterećenja potrebno povećavati struju pobude pri $\varphi<0$, a smanjivati je ako je $\varphi>0$. Ukoliko je ugao φ po apsolutnoj vrijednosti veći, to u širim granicama je potrebno mijenjati struju pobude.

Isto tako, kada je faktor snage lošiji, promjena napona je veća, pa se za isto opterećenje mora povećati pobudna struja da bi se dobio opet nominalni



Sl. 5.29. Karakteristike regulacije sinhronog generatora pri različitim vrstama opterećenja



Sl. 5.30. Shema spoja sinhronog generatora sa mrežom i generatorom istosmjerne struje (tzv. budilica) u čijem se kolu struje pobude nalazi automatski brzi regulator

napon. Stoga se karakteristika regulacije pri $\cos\varphi=0{,}8$ (induktivno) nalazi iznad karakteristike regulacije koja važi za faktor snage $\cos\varphi=1$.

Promjene napona koje nastaju pri promjenama struje opterećenja štetno utiču na trošila koja su priključena na mrežu koju generator napaja. Zato je potrebno izvršiti stabilizaciju napona na krajevima generatora, a to postižemo regulacijom struje pobude generatora istosmjerne struje (tzv. budilice) koji se nalazi na istoj osovini sa njim. To ostvarujemo automatski pomoću tzv. *brzih regulatora struje pobude*, koji imaju različitu konstrukciju i koji sami reaguju na promjenu napona generatora. Na sl. 5.30. prikazana je shema spoja generatora s mrežom i budilicom u čijem se kolu struje pobude I_{pb} nalazi regulacioni otpornik R_r. Pri porastu opterećenja napon sinhronog generatora pada, elektromagnet *EM* koji je spojen na krajeve generatora *A* i *B* oslobađa jezgru pomoću opruge *o* u smjeru prema gore, čime se smanji vrijednost otpora regulacionog otpornika R_r, poveća pobudna struja I_{pb} budilice. Time se poveća napon i struja budilice I_p i, napokon, poveća se i napon generatora.

Obrnuto, pri padu opterećenja poraste napon generatora između krajeva *A* i *B*, jezgra elektromagneta *EM* se više uvuče, čime se uključi veći otpor otpornika u pobudnom kolu budilice, smanji se pobudna struja I_{pb} budilice, a time se smanji i pobudna struja I_p generatora, pa se njegov napon snizi. Na taj način brzi regulator automatski reguliše (mijenja, podešava) napon generatora ovisno o opterećenju i održava ga na stalnoj vrijednosti.

Pri kratkom spoju generatora sklopka *S* kratko spoji njegov pobudni namotaj preko otpornika *r*, pa se magneti generatora razmagnetišu i on ostane bez napona.

NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI — NEOBAVEZNO ZA III STEPEN STRUČNOSTI

5.3.6. **Gubici snage i stepen korisnog djelovanja**

Da bi razmotrili još jednu karakteristiku sinhronog generatora, odnosno karakteristiku stepena korisnog djelovanja, potrebno je prethodno upoznati se sa gubicima snage.

U sinhronim mašinama nastaju isti gubici snage kao i u istosmjernim mašinama. To su: mehanički gubici, gubici u željezu, gubici u bakru. Tu spadaju i dodatni gubici. O gubicima u željezu i bakru nećemo ovdje govoriti, jer su oni obrađeni u mašinama istosmjerne struje.

Međutim, kada je riječ o mehaničkim gubicima, onda sinhrone mašine imaju svoju specifičnost. Naime, u te gubitke spadaju tzv. *ventilacioni gubici*. To su gubici koji nastaju prilikom trenja rotora o vazduh i oni koji su rezultat provjetravanja. Sam rotor se ponaša kao ventilator i na to se troši jedan dio snage. Gubici snage na provjetravanje predstavljaju snagu posebnog ventilatora, kojim se održava zatvoreno kružno strujanje vazduha ili drugog sredstva s ciljem hlađenja mašine. Pokus pokazuje da su u turbogeneratorima gubici pri ventilaciji veoma veliki

ponekad premašuju i 50% ukupnih gubitaka u mašini. Da bismo ih smanjili, umjesto vazduha kao rashladno sredstvo uzet je vodik. Vodik ima 14 puta manju gustoću od vazduha i sedam puta bolju toplotnu vodljivost. Zato se pri jednakom zagrijavanju namotaja snaga mašine hlađenja vodikom može povećati za 25 do 30%.

Dodatni gubici u sinhronim mašinama su vrlo značajni i mogu da nepovoljno utiču na iskorištenje mašine i na njeno zagrijavanje. Zato je potrebno znati šta je njihov uzrok nastajanja. To su pojave: rasipni magnetni tokovi u statoru, viši harmonici magnetnih napona i gubici vezani za ozubljenost statora i rotora kod mašina sa neistaknutim polovima.

U sinhronim mašinama snage do isključivo 100 kVA dodatni gubici iznose približno 0,5% od nominalne snage.

Da bismo izračunali stepen korisnog djelovanja kod sinhrone mašine, polazimo od njene korisne snage P_k, pošto je ona električna i određujemo je mjerenjem na vrlo lak način ovako:

$$P_{kG} \text{ ili } P_{kM}=3U_fI_f\cos\varphi=\sqrt{3}U_l\cdot I_l\cos\varphi \qquad \ldots\ldots \text{(5.30)}$$

gdje je:

3 — broj faza, U_f i U_l — fazni i linijski naponi,

I_f i I_l — fazna i linijska struja, φ — ugao pomaka između U_f i I_f.

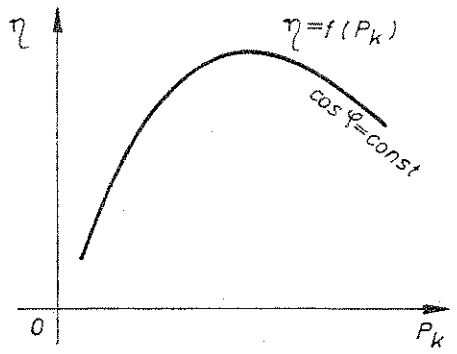
Dodajući korisnoj snazi sve gubitke snage, dobijemo utrošenu snagu generatora:

$$P_u=P_k+P_{meh}+P_{Fe}+P_{Cu}+P_{dod} \qquad \ldots\ldots \text{(5.31)}$$

Pošto je stepen korisnog djelovanja odnos između korisne snage P_k i utrošene P_u, dobivamo:

$$\eta=\frac{P_k}{P_u}=\frac{P_k}{P_k+\Sigma P_g}=1-\frac{\Sigma P_g}{P_k+\Sigma P_g} \qquad \ldots\ldots \text{(5.32)}$$

Karakteristika stepena korisnog djelovanja je krivulja koja pokazuje kako se mijenja stepen iskorištenja u zavisnosti od korisne snage, a pri stalnom faktoru snage. Na sl. 5.31. predstavljen je njen izgled.



Sl. 5.31. Karakteristika stepena korisnog djelovanja sinhronog generatora

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta je uzrok promjene napona na krajevima opterećenog sinhronog generatora?
2. Napiši formulu za relativnu promjenu napona!
3. Nacrtaj pojednostavljeni vektorski dijagram napona kada je sinhroni generator opterećen aktivno—induktivno! Šta u njemu predstavlja ugao ψ?
4. Nacrtaj karakteristiku praznog hoda sinhronog generatora i objasni šta ona pokazuje!
5. Šta pokazuje vanjska karakteristika i od čega zavisi njen oblik?
6. Nacrtaj i komentariši vanjske karakteristike generatora pri različitim vrstama opterećenja!
7. Nacrtaj karakteristike regulacije pri raznim vrstama opterećenja i objasni kako se održava stalan napon!
8. Objasni kako na automatski način regulišemo napon na krajevima sinhronog generatora!
9. Koji gubici snage su karakteristični baš za sinhroni generator?

5.4. PARALELNI RAD SINHRONIH GENERATORA

5.4.1. Opšte napomene

Sinhroni generator može da radi u različitim pogonskim prilikama. Pri tome može da radi samostalno na vlastitu mrežu ili zajedno sa drugim generatorima napajajući tzv. „krutu mrežu" (u kojoj vlada stalan napon).

U praksi se rijetko događa da sinhroni generator radi na mreži potpuno samostalno, odnosno da su električna trošila priključena na mrežu koju napaja samo jedan sinhroni generator. To je, uglavnom, onda kada se takav generator (relativno male snage sa dizel — motorom kao pogonskim strojem) koristi kao rezervni izvor električne energije u bolnicama, aerodromima, velikim poslovnim zgradama i sl.

U savremenim elektranama po pravilu se nalazi više sinhronih generatora koji rade paralelno. Elektrane su povezane u elektroenergetski sistem koji obuhvata najčešće regione, države pa i velike dijelove kontinenta, npr. Zapadna Evropa ili Istočna Evropa.

Paralelan rad većeg broja elektrana, odnosno generatora velikih snaga ima znatne prednosti. To su: obezbjeđenje sigurnosti rada sistema, smanjenje broja rezervnih generatora koji se uključuju u slučaju remonta ili kvarova drugih generatora, najekonomičnija proizvodnja i optimalna raspodjela opterećenja između pojedinih elektrana, odnosno generatora. Postoji mogućnost za vrlo povoljnu raspodjelu opterećenja između hidroelektrana i termoelektrana. Naime, snaga hidroelektrana se maksimalno koristi za vrijeme visokih vodostaja, dok se za vrijeme niskih vodostaja koristi snaga termoelektrana.

Poznato nam je da se snaga koju daje elektrana tokom dana mijenja i da tu promjenu pratimo prema dijagramu dnevnog opterećenja. Kada bi se pri smanjenom dnevnom opterećenju zadržali u radu svi spojeni generatori, onda bi oni radili sa manjim stepenom korisnog djelovanja, što nije ekonomično. Zato se tokom dana u zavisnosti od dnevnog opterećenja jedan broj generatora može i više puta isključiti ili uključiti, nastojeći pri tome da oni koji su u pogonu rade pod nominalnim opterećenjem. Postupak uključenja generatora na mrežu za koju već paralelno rade

drugi generatori naziva se *sinhronizovanje*. To je radnja koja se svakodnevno obavlja automatski, poluautomatski ili ručno sinhronim generatorima.

Paralelan rad sinhronih generatora zahtijeva ispunjavanje niza specifičnih uslova neophodnih za njihovo uključivanje na mrežu sa što manjim strujnim udarom, bez kvarova i za veću sigurnost u njihovom paralelnom radu.

5.4.2. Uslovi za paralelan rad

Slično transformatorima, i kod sinhronih generatora postavlja se više uslova za njihov uspješan paralelan rad. To su:

— indukovani napon novog generatora mora biti jednak naponu mreže ($E_f = U_m$),

— frekvencija indukovanog napona novog generatora mora biti jednaka frekvenciji napona mreže na koju se generator priključuje ($f = f_m$),

— indukovani napon novog generatora mora biti u fazi sa naponom mreže (vektori E_f i U_m se podudaraju),

— ako se radi o trofaznim sinhronim generatorima, onda redoslijed faza generatora koji priključujemo mora biti isti sa generatorima koji već rade na mreži. Budući da se po izvodima (stezaljkama) generatora ne može utvrditi redoslijed faza, oni se moraju provjeriti prije uključivanja generatora na sabirnice. Ovaj uslov se utvrdi i ispuni pri prvom puštanju novog generatora u paralelan rad i poslije ga nije ni potrebno kontrolisati.

Prvi uslov može da se ispita i utvrdi pomoću dva voltmetra. Drugi i treći uslov kontrolišemo pomoću tzv. *sinhronizacionih faznih sijalica* ili *sinhronoskopa*.

5.4.3. Sinhronizacija pomoću sinhronizacionih sijalica

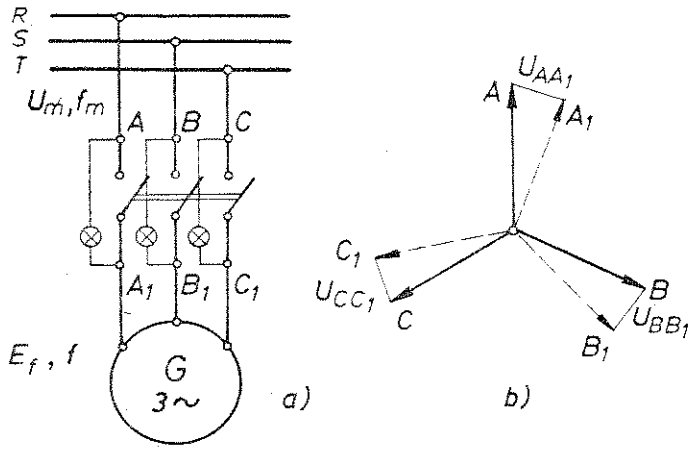
Prije nego što trofazni sinhroni generator priključimo na mrežu za paralelan rad, potrebno je pomoću pogonskog stroja (turbine) dovesti njegov rotor na nominalnu brzinu okretanja (sinhronu brzinu), čime je postignuta približna jednakost frekvencija ($f = f_m$). Nakon toga postepeno povećavamo struju pobude dok se na krajevima generatora ne postigne napon jednak naponu mreže ($U_f = U_m$). Kada će se postići podudaranje (jednakost) napona generatora i mreže i odrediti momenat u kojem se generator može uključiti na mrežu, utvrđujemo pomoću sinhronizacionih sijalica spojenih na sve tri faze generatora. Pri tome, sijalice se mogu spojiti na dva načina:

— *tamni spoj* i

— *spoj sa svjetlom koje rotira.*

Tamni spoj. Na sl. 5.32a. prikazano je spajanje trofaznog sinhronog generatora na mrežu pri ugašenim sijalicama u tzv. tamnom spoju. Svaka sijalica spaja se na dva kraja jednog te istog noža sklopke. Pretpostavimo da je redoslijed faza generatora što rade na mrežu i onoga koji se priključuje na nju jednak. U tom slučaju napon mreže i indukovani napon generatora možemo prikazati sa dvije zvijezde istog redoslijeda vektora (sl. 5.32b). Zbog jednostavnosti njihove nulte

tačke poklapamo jednu na drugu i možemo uslovno smatrati da jedna od zvijezda npr. $A-B-C$ (zvijezda napona mreže) miruje, a druga $A_1-B_1-C_1$ (zvijezda indukovanih napona) se okreće u odnosu na prvu, za razliku njihovih ugaonih



Sl. 5.32. Spajanje trofaznih sinhronih generatora na mrežu pri ugašenim sijalicama: a) shema spajanja sijalica, b) vektorski dijagram napona.

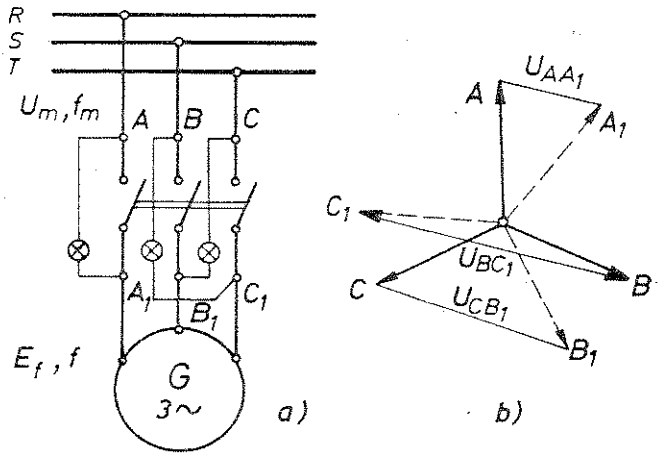
brzina ($\omega_2-\omega_m$). Naponi na krajevima sijalica (U_{AA_1}, U_{BB_1} i U_{CC_1}) prikazani su rastojanjima između vrhova vektora dviju zvijezda koji pripadaju istoj fazi i nije teško zaključiti da će se sijalice istovremeno paliti i gasiti. Onog momenta kada se odgovarajući vektori dviju zvijezda podudare, doći će do gašenja sijalica (napon na krajevima sijalica jednak je nuli) i u tom trenutku uključujemo sklopku generatora.

Spoj sa svjetlom koje rotira. Na sl. 5.33a. prikazano je spajanje trofaznog sinhronog generatora na mrežu pomoću sijalica čija svjetlost rotira. To je tzv. svijetli spoj. Jedna sijalica spojena je između krajeva jednog noža sklopke (u tamni spoj), dok su druge dvije povezane unakrsno na krajeve druga dva noža (u svijetlom spoju). Dok nisu ispunjeni uslovi sinhronizacije, kako se vidi prema vektorskom dijagramu napona (sl. 5.33b), sijalice svijetle različitom jačinom, a pale se i gase naizmjenično jedna za drugom. Redoslijed paljenja sijalica ovisi o relativnoj brzini okretanja zvijezda napona, odnosno o relativnoj brzini okretanja generatora. Ako sijalice postavimo ukrug, imaćemo utisak kao da svjetlo rotira. Prema smjeru rotacije svjetla zaključujemo da li se generator okreće brzo ili sporo, pa se na temelju toga reguliše njegova brzina radi sinhronizacije.

Kada svjetlo prestane rotirati, sijalica priključena u tamni spoj ostaje tamna, a ostale dvije izrazito svijetle. Tada je postignut sinhronizam i generator se sklopkom uključuje na mrežu.

Pored sinhronizacionih sijalica, u opremu za dovođenje sinhronih generatora u paralelan rad sa mrežom spadaju: dvostruki voltemetar, dvostruki frekvencmetar, nulti voltmetar i sinhronoskop.

Dvostruki voltmetar ima dva mjerna sistema sa dvije kazaljke na istoj skali (jedna odozgo, a druga odozdo). Jedan voltmetar se priključuje na mrežu i mjeri napon mreže, a drugi indukovani napon generatora. Dvostruki frekvencmetar



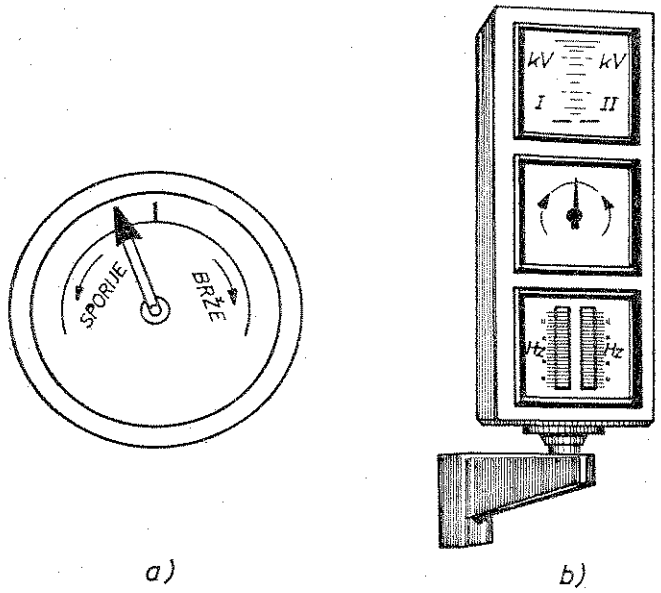
Sl. 5.33. Spajanje trofaznih sinhronih generatora na mrežu pomoću svjetlosti koja rotira: a) shema spoja sijalica, b) vektorski dijagram napona.

također sadrži dva vibraciona sistema od kojih jedan pokazuje frekvenciju mreže, a drugi frekvenciju indukovanog napona generatora koji se sinhronizuje.

Da bi se generator sinhronizovao, sklopku treba uključiti tačno u polovini vremena za koje sijalice ostaju ugašene. Da bi se taj trenutak tačnije odredio, u seriju sa jednom od sijalica veže se nulti voltmetar. On je naročito osjetljiv na male vrijednosti napona, pa se sklopka uključuje kada je kazaljka voltmetra na nuli.

5.4.4. **Sinhronizacija pomoću sinhronoskopa**

Umjesto sijalica za sinhronizaciju sinhronih generatora većih snaga upotrebljava se posebna naprava nazvana sinhronoskop. To je, u stvari, specijalni mali motor, na čiji se namotaj dvopolnog jednofaznog statora dovodi napon generatora koji treba sinhronizovati, a na namotaj trofaznog rotora napon mreže. Na vratilu ovog malog motora nalazi se kazaljka koja pokazuje položaj rotora prema statoru. Sinhronoskop radi na principu obrtnog magnetnog polja, odnosno na razlici frekvencija napona statora i rotora. Naime, ako su frekvencije jednake, rotor i njegova kazaljka stoje u položaju koji zavisi od međusobnog položaja vektora napona statora i rotora. Ako su noponi u fazi, kazaljka stoji u položaju označenom nulom. Ukoliko su frekvencije različite, kazaljka se pomjera u jednom ili u drugom smjeru. Na sinhronoskopu koji je prikazan na sl. 5.34. smjerovi označeni sa „BRŽE" i „SPORIJE" odnose se na regulisanje brzine generatora, a time i njegove frekvencije, koji treba sinhronizovati.



Sl. 5.34. Sinhronoskop: a) predniji izgled sinhronoskopa, b) sinhronoskop s dvostrukim voltmetrom i dvostrukim frekvencmetrom.

Kada je sinhronizovanje završeno, uključivanje sklopke generatora može da se izvrši ručno, daljinski ili što je danas najčešće automatski. Ne samo uključivanje generatora na mrežu nego i cijeli postupak sinhronizovanja (regulisanje broja okretaja generatora) je automatizovan i upravlja se jednim malim procesnim računarom.

5.4.5. **Samosinhronizacija**

Opisani načini uključivanja sinhronih generatora na mrežu relativno su složeni procesi koji zahtijevaju veliku tačnost, a uz to, što je najvažnije, i gubitak vremena (5 do 10 minuta). Zbog toga se u posljednje vrijeme uključivanje sinhronih generatora u snažne elektroenergetske sisteme obavlja metodom samosinhronizacije (gruba sinhronizacija). Postupak se izvodi u tri kratka koraka:

— pogonskim strojem generator se zavrti brzinom koja se može razlikovati od sinhrone za ± 2 do 3%;

— nakon toga se pomoću sklopke generator uključuje na mrežu bez prethodnog pobuđivanja. Pri tome se pobudni namotaj kratko spaja ili premošćuje nekim dodatnim otporom da bi se izbjegao prenapon koji može nastati u trenutku uključenja;

— na kraju uključujemo pobudnu struju i postepeno je povećavamo dok generator ne uđe u sinhronizam.

U momentu uključivanja generatora na mrežu u njegovom statoru neizbježno nastaje strujni udar koji nekoliko puta premašuje vrijednost nominalne struje.

Uz to, na osovini generatora pojaviće se mehanička naprezanja koja nisu velika pa time ni opasna po mašinu. Vrijeme za koje će struja statora pasti na svoju nominalnu vrijednost kreće se u granicama od 1 do 7 sekundi.

Iz svega izloženog možemo zaključiti da je uključivanje generatora u paralelan rad metodom samosinhronizovanja veoma pojednostavljen proces, zahtijeva vrlo malo vremena, lako se može automatizovati i u posljednje vrijeme se vrlo često primjenjuje.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Kada generator radi na mreži potpuno samostalno, a kada paralelno?
2. Koje uslove moraju ispunjavati sinhroni generatori da bi mogli uspješno paralelno raditi za jednu mrežu?
3. Nacrtaj shemu i objasni postupak sinhronizacije pomoću faznih sijalica u tamnom spoju!
4. Objasni postupak sinhronizacije pomoću sinhronoskopa!
5. Objasni postupak samosinhronizacije!

5.5. **SINHRONI MOTORI**

5.5.1. **Opšte osobine i primjena sinhronih motora**

Na početku smo kazali da je sinhrona mašina, kao i sve ostale mašine, reverzibilna, tj. može da radi i kao generator i kao motor. Međutim, sinhronoj mašini unaprijed određujemo ulogu. Sinhroni motori izvode se uglavnom za veće snage i upotrebljavaju se u pogonima koji zahtijevaju stalnu brzinu okretanja. Prednost im je što mogu da rade, za razliku od svih ostalih motora naizmjenične struje, sa $\cos\varphi = 1$, pa ako je potrebno, mogu da mreži daju reaktivnu energiju, odnosno da popravljaju faktor snage u nekom proizvodnom pogonu gdje rade razne vrste motora.

Uporedujući ga sa asinhronim motorom, manje je osjetljiv na promjenu napona mreže, pošto je njegov prekretni momenat srazmjeran naponu, a ne kvadratu napona kao kod asinhronog motora. Bez obzira na mehaničko opterećenje, njegova brzina okretanja se ne mijenja (stalna je).

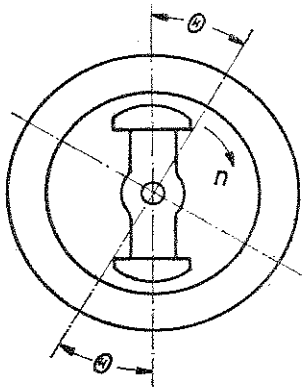
Pored prednosti koje smo nabrojali, sinhroni motor ima i vrlo velike nedostatke. To su: složena konstruktivna izvedba, napajanje sa dvije vrste struje (naizmjeničnom i istosmjernom), dosta komplikovan način puštanja u rad, prilikom preopterećenja lako ispadaju iz sinhronizma i prestaje da radi. Regulaciju brzine okretanja gotovo da je nemoguće izvršiti.

Svi ovi nedostaci sinhronih motora govore da je njegova primjena u odnosu na asinhroni motor vrlo ograničena. Primjenjuje se za pogon centrifugalnih i klipnih pumpi, velikih kompresora, velikih ventilatora itd.

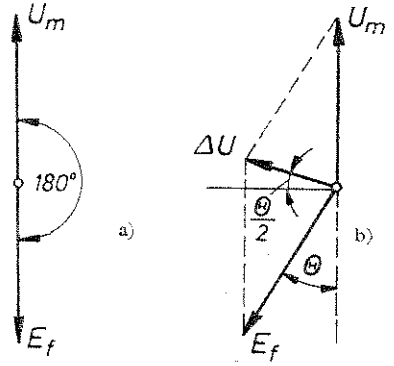
5.5.2. **Način rada**

Način rada sinhronog motora isti je kao i kod sinhronog generatora, s tim što cijeli proces posmatramo obrnuto. Pretpostavimo da je sinhrona mašina sinhronizovana i priključena na mrežu. Ako je vratilo mašine slobodno, onda ona radi kao generator u praznom hodu. U namotaju statora indukovaće se napon koji drži ravnotežu naponu mreže. To je tzv. protunapon.

Ako sada vratilo pogonskog stroja odvojimo od vratila rotora sinhrone mašine, rotor produžava i dalje da se okreće, odnosno sinhrona mašina počinje da radi kao motor pri praznom hodu.



Sl. 5.35. Pomjeranje ose magnetnog polja rotora u odnosu na magnetno polje statora za ugao Θ pri opterećenju sinhronog motora



Sl. 5.36. Vektorski dijagram sinhronog motora: a) ravnoteža indukovanog napona statora sa naponom mreže, b) vektorska slika napona kod opterećenog sinhronog motora.

Opteretimo li sada rotor nekim radnim mehanizmom, sinhrona mašina nastavlja da radi kao motor pri opterećenju sa nešto smanjenom brzinom okretanja. Uslijed toga će se osa magnetnog polja rotora pomjeriti od ose magnetnog polja statora za neki ugao Θ, ali u suprotnom smjeru od onog kada je mašina radila kao generator, kako je prikazano na sl. 5.35. Sada je utrošena snaga električna i uzima se iz mreže, a korisna snaga je mehanička, koja se preko rotora daje radnom mehanizmu. Zbog toga što je rotor zaostao za ugao Θ, indukovani napon u statorskom namotaju E_f ne drži više ravnotežu naponu mreže U_m već je pomaknut za taj ugao u odnosu na napon mreže, kako je prikazano na sl. 5.36b. Između napona mašine i napona mreže pojavila se razlika napona ΔU, i to je upravo onaj napon zbog koga sada struja teče iz mreže u statorski namotaj. Primljena električna energija iz statora se elektromagnetnim putem prenosi na rotor u obliku mehaničke energije.

5.5.3. **Puštanje sinhronih motora u rad**

Najveća teškoća kod sinhronih motora je puštanje u rad. Naime, priključi li se namotaj statora na trofaznu naizmjeničnu mrežu, a pobudni namotaj rotora na izvor istosmjerne struje, rotor mašine se neće pokrenuti. Zašto? Čim se motor priključio na mrežu, stvoreno obrtno magnetno polje statora počeće se okretati

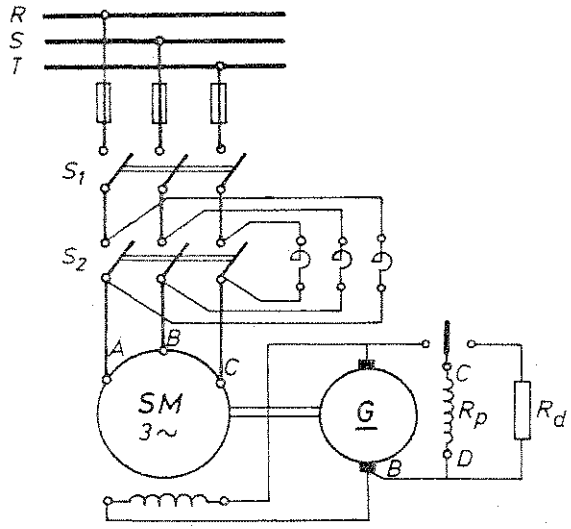
sinhronom brzinom oko nepokretnog rotora. Pretpostavimo da je ta sinhrona brzina 3 000 °/min, što znači da ćemo u toku jedne sekunde imati 50 proizvedenih magnetnih sila u jednom smjeru i 50 u drugom smjeru i one djeluju na rotor. Srednja vrijednost momenata nastalih uslijed ovih sila u toku jedne periode biće jednaka nuli, jer on u toku jedne poluperiode djeluje u jednom smjeru, a u toku druge poluperiode u suprotnom smjeru. Pri svim ovim uslovima, a i zbog svoje inertnosti rotor motora se neće pokrenuti.

Da bi sinhroni motor počeo raditi, potrebno je prethodno njegov rotor dovesti do brzine okretanja koja je bliska sinhronoj. To praktično izvodimo mehanički. Ako je motor vrlo male snage, zalijetanje izvodimo ručno, a ako je motor velike snage, onda zalijetanje izvodimo pomoću pomoćnog motora koji može biti motor sa unutrašnjim sagorijevanjem, istosmjerni motor, asinhroni motor i sl. U ovom slučaju, kada brzina rotora dođe blizu sinhrone, prvo se uključi pobudni namotaj, a zatim se namotaj statora priključuje na mrežu. Naravno, poslije ulaska sinhronog motora u sinhronizam, pomoćni motor više nije potreban i isključuje se.

Danas se većina sinhronih motora koji pokreću elektromotorne pogone i razne mehanizme kod kojih se zahtijeva stalnost brzine okretanja, grade obično za snage počev od 100 kW pa naviše. Svi oni imaju u polnim nastavcima ugrađen prigušni namotaj koji je isti kao kavez kod asinhronog motora (vidi sl. 5.18), pa se stoga puštaju u rad kao asinhroni motori sa kratkospojenim rotorom.

Proces puštanja pomoću kaveznog namotaja teče ovako: statorski namotaj sinhronog motora priključi se na mrežu, kroz njega poteče struja koja stvori obrtno magnetno polje koje u provodnicima kaveznog rotora indukuje napon. Taj indukovani napon protjera struju kroz štapove kaveza koja ga pokrene i dovede vrlo blizu sinhrone brzine.

Da bi se spriječilo indukovanje visokog napona (i do 2 000 V) u pobudnom namotaju koji bi mogao da izazove proboj njegove izolacije, pri puštanju u rad,



Sl. 5.37. Puštanje u rad sinhronog motora pomoću prigušnica

u pobudni namotaj uključuju se odgovarajući radni otpornici čiji je otpor i do desetak puta veći od njegovog aktivnog otpora. Strujne udare u mreži koji nastaju prilikom puštanja sinhronog motora u rad smanjujemo na taj način što se njegov stator preko prigušnica ili autotransformatora priključuje na smanjeni napon, kako je prikazano na sl. 5.37.

Pri puštanju u rad najprije se uključi sklopka S_1, dok je sklopka S_2 otvorena. Uslijed pada napona na prigušnicama, napon na krajevima motora iznosi oko 60 do 70% nominalnog napona. Kada motor pod ovim naponom krene i ubrza se, uključuje se sklopka S_2, čime se prigušnice premošćuju, a sinhroni motor priključuje na puni napon mreže. Zatim se pobuđivanjem ostvaruju uslovi za ulazak u sinhronizam.

Smanjenjem napona smanjuje se i struja pokretanja, a uz to je znatno smanjenje i pokretnog momenta.

5.5.4. **Sinhroni (fazni) kompenzator**

Sinhroni motor koji radi samo u režimu praznog hoda pri promjenljivoj struji pobude I_p naziva se *sinhroni* ili *fazni kompenzator*. Ako je sinhroni motor jako pobuđen (nadpobuđen), struja I prethodi naponu mreže U_m, tj. ona je kapacitivna u odnosu na taj napon, a ako je slabo pobuđen (podpobuđen), struja I zaostaje iza napona mreže U_m, tj. ona je induktivna. To jednostavno možemo objasniti djelovanjem magnetne reakcije statora. Induktivna komponenta struje statora magnetiše magnetno kolo motora i tada on vuče iz mreže samo *aktivnu snagu* za pokriće gubitaka, dok kapacitivna komponenta struje statora djeluje obratno, razmagnećuje magnetno kolo motora i tada on šalje *reaktivnu (jalovu) snagu* u mrežu.

Dakle, u praksi su široku primjenu našli upravo sinhroni kompenzatori (vrlo jednostavne izvedbe, rade bez opterećenja i jako su pobuđeni) koji uzimaju iz mreže struju koja prethodi naponu (praktično kapacitivna struja) i tako služe za *popravak faktora snage mreže*.

Obično u mrežama napajanim sinhronim generatorima preovladava induktivno opterećenje, jer transformatori i široko rasprostranjeni asinhroni motori upotrebljavaju indukivne struje magnetiziranja. Rad generatora na dugačkom dalekovodu ili gustoj kablovskoj mreži uzrokuju ponekad znatne kapacitivne efekte. Ako sa I_a označimo aktivnu komponentu struje u mreži, a sa I_L njenu reaktivnu (jalovu) komponentu, onda ćemo ukupnu struju u mreži dobiti formulom:

$$I=\sqrt{I_a^2+I_L^2} \qquad \ldots\ldots (5.33)$$

Mreža kao i svi njeni elementi (generatori, transformatori itd.) proračunavaju se za struju I. Odatle slijedi da se povećanjem reaktivne (jalove) komponente struje i smanjenjem faktora snage $\cos\varphi$ smanjuju aktivna snaga generatora i propusna moć dalekovoda, transformatora i dr.

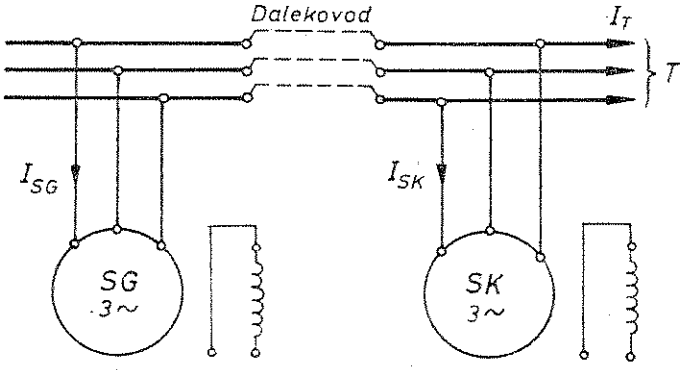
Da bi se elektroenergetski sistem rasteretio suvišnih reaktivnih struja, na podesnom mjestu takve mreže postavlja se fazni kompenzator koji u većini slučajeva radi u nadpobuđenom stanju i služi za kompenzaciju indukovanih struja u dalekovodima i generatorima u svrhu poboljšanja faktora snage $\cos\varphi$.

Primjer 1

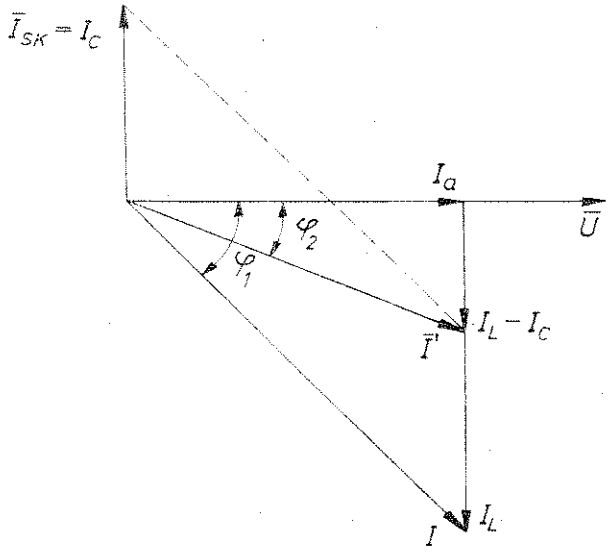
Sinhroni generator SG radi na induktivno opterećenje, pri čemu trošilo T koristi aktivnu komponentu struje $I_a=1\,000$ A i reaktivnu (jalovu) $I_L=1\,000$ A. U tom slučaju potrebna struja je:

$$I=\sqrt{I_a^2+I_L^2}=\sqrt{1000^2+1000^2}=1414\text{ A}$$

$$\cos\varphi=\frac{I_a}{I}=\frac{1000}{1414}=0{,}71.$$



Sl. 5.38. Shema spajanja sinhronog kompenzatora na mrežu



Sl. 5.39. Vektorski dijagram struja trošila i sinhronog kompenzatora

Da bi se generator i dalekovod rasteretili jalovih struja, pri trošilima energije postavljamo sinhroni kompenzator *SK*, kako je prikazano na sl. 5.38. Sinhroni kompenzator uz određenu nadpobudu vuče iz mreže kapacitivnu struju $I_C=600$ A koja prethodi naponu za približno 90°, kako je prikazano na sl. 5.39. U tom slučaju će u dalekovodu i generatoru jalova struja biti:

$$I_L-I_C=1\,000-600=400 \text{ A}.$$

Prema tome, struja u dalekovodu i generatoru biće:

$$I'=\sqrt{I_a^2+(I_L-I_C)^2}=\sqrt{1000^2+400^2}=1077 \text{ A}.$$

U tom slučaju faktor snage generatora biće:

$$\cos\varphi=\frac{I_a}{I'}=\frac{1000}{1077}=0{,}93.$$

Treba istaći da sinhroni kompenzator poboljšava faktor snage $\cos\varphi$ u generatoru i na onom dijelu dalekovoda koji se nalazi izmedu sinhronog generatora i kompenzatora.

Iz primjera se vidi da se struja u generatoru i dalekovodu umanjila za 1 414 − −1 077=337 A, što je zahtijevalo upotrebu sinhronog kompenzatora od 600 A.

PITANJA ZA PROVJERU

1. U koje svrhe upotrebljavamo sinhroni motor?
2. Koje prednosti ima sinhroni motor u odnosu na asinhroni i šta su mu nedostaci?
3. Objasni način rada sinhronog motora!
4. Kako izgleda vektorski dijagram sinhronog motora?
5. Koje teškoće nastaju pri puštanju sinhronih motora u rad?
6. Na koje se načine može sinhroni motor pustiti u rad?
7. Kako teče postupak puštanja sinhronog motora u rad pomoću kaveznog namotaja ugrađenog u polnim nastavcima?
8. Kada sinhroni motor radi kao sinhroni ili fazni kompenzator i šta se time postiže?
9. Kada će sinhroni kompenzator djelovati kao prigušnica, odnosno trošilo jalove energije iz mreže?

ELEKTROMOTORNI POGONI I ELEKTRIČNA VUČA

6.1. ELEKTROMOTORNI POGONI

6.1.1. Opšte o elektromotornim pogonima

Pod pojmom elektromotornog pogona podrazumijevamo pokretanje radnog stroja ili grupe radnih strojeva pomoću električnog motora. Elektromotorni pogon uglavnom se sastoji od četiri osnovna elementa. To su:

— elektromotor,
— radni mehanizam,
— spojni elementi elektromotora sa radnim mehanizmom i
— elementi kojima se elektromotorni pogon priključuje na izvor električne energije i kojima se elektromotorni pogon reguliše ili se njime upravlja.

U današnje vrijeme su umjesto drugih motornih pogona, gdje je god moguće primijeniti elektromotor, uvedeni elektromotorni pogoni. To je učinjeno zbog toga što elektromotori imaju prednost nad ostalim mašinama koje vrše mehanički rad. Te prednosti su: vrlo velika ekonomičnost (stepen korisnog djelovanja ide i do 98%), neposredna spremnost za pogon uz puno opterećenje i vrlo dobra prilagodljivost radnom mehanizmu i ukupnom tehnološkom procesu, jednostavno snabdijevanje energijom, jednostavno pokretanje, velike mogućnosti regulacije i automatizacije, ne zagađuje okolinu i sl.

Kako smo već ranije naučili, elektromotori se mogu izvesti za širok opseg brzine okretanja, za stalni i jednolični momenat, za kratkotrajna i trajna opterećenja, za opšte uslove okoline (zagađenost atmosfere raznim eksplozivnim plinovima, vlagom, prašinom i dr.).

Prvi elektromotorni pogoni bili su vrlo jednostavni. Motori su u trajnom, stacionarnom stanju pogonili radni mehanizam stalnom brzinom okretanja. Zaletu motora poklanjala se mala pažnja. Važno je bilo dovesti pogon u radnu brzinu, dok se ostala dinamička stanja nisu dovoljno iskorištavala.

Želja za povećanjem proizvodnje zahtijeva ne samo snažne mašine koje brže rade već i brže pokretanje, zaustavljanje te promjenu smjera okretanja, osobito gdje su te promjene česte. Stoga razvoj modernih elektromotornih pogona posvećuje sve veću pažnju pitanjima dinamike pogona. Sve više elektromotornih pogona obavlja cikluse radnih operacija u kojima osim statičkih ima i raznih dinamičkih stanja (zalet, kočenje, ubrzanje itd.) ili čak samo dinamička stanja, pa je elektromotor stalno u stanju prelazne pojave. Razvojem gradnje elektromotora stvorene

su nove mogućnosti za poboljšanje i skraćenje tehnoloških procesa koje elektromotorni pogoni obavljaju. Na kraju, razvila se gradnja specijalnih elektromotora za određene procese s jedne strane, a s druge strane razvoj upravljačkih elemenata elektromotornog pogona doveo je do sistema (automatske) regulacije i do automatizacije pojedinih operacija i radnih procesa, pa i automatizacije čitavih fabrika.

Sistematizacija elektromotornih pogona ranije se poklapala uglavnom sa sistematizacijom industrijskih grana, pa smo imali elektromotorne pogone u rudarstvu, metalurgiji i drugim različitim industrijama. Međutim, neki radni mehanizmi, iako se upotrebljavaju u različitim granama proizvodnje, prometa i dr., imaju iste tehničke parametre (statička i dinamička stanja, cikluse operacija itd.), pa se elektromotorni pogoni sistematizuju u grupe sa istom tehničkom problematikom, bez obzira na to u kojoj se grani industrije primjenjuju.

6.1.2. **Karakteristične osobine radnih mehanizama**

Jedna od najvažnijih veličina radnog mehanizma je njegov *momenat tereta* M_t. To je momenat na njegovoj osovini prouzrokovan korisnim otporima (vršenje radnog procesa) i štetnim otporima (gubicima). Momenat tereta najčešće se suprotstavlja okretanju (kretanju), a ima slučajeva kad ga potpomaže. Iz tog izlazi da imamo dva momenta tereta: *aktivni (potencijalni)* i *reaktivni (otporni)*.

Aktivni momenat tereta, čije je djelovanje ovisno o potencijalnoj energiji sistema, zadržava smjer djelovanja neovisno o smjeru okretanja. Ovaj momenat tereta imaju mehanizmi za dizanje i spuštanje tereta, za stiskanje i rastezanje sistema sa oprugama itd.

Reaktivni momenat tereta uvijek mijenja smjer djelovanja kada se mijenja smjer kretanja. Ovakav momenat tereta imaju mehanizmi za električnu vuču, alatni strojevi i dr.

Momenat tereta radnih mehanizama ovisi o brzini okretanja, o putu, vremenu, o specifičnostima tehnološkog procesa kao i drugim faktorima. Prema tome kako se mijenja momenat tereta, radne mehanizme uslovno možemo podijeliti na:

— mehanizme kod kojih je momenat tereta funkcija brzine okretanja: $M_t=f(n)$, $M_t=f(\omega)$. Tu spadaju transportne trake, centrifugalne pumpe, kompresori, predionički stanovi i drugi;

— mehanizme kod kojih je momenat tereta funkcija brzine okretanja i vremena: $M_t=f(n,t)$, pri čemu ovisnost o vremenu može biti data programom ili biti slučajna kako se to dešava u električnoj vuči, kod dizalica, alatnih strojeva i dr.;

— mehanizme kod kojih momenat tereta ovisi ne samo o brzini okretanja već i o uglu zakretanja obrtnog dijela mehanizma ili rotora elektromotora: $M_t=f(n,\alpha)$. Tu spadaju klipni kompresori, klipne pumpe, kovački strojevi, makaze za rezanje metala i dr.;

— mehanizme kod kojih momenat tereta ovisi ne samo o brzini okretanja i vremenu već i o drugim veličinama kao što su put, položaj, materijal i procesi u njemu itd.: $M_t=f(n,t,\ldots)$. Tu spadaju malobrojni mehanizmi i svaki od njih ima svoje specifičnosti (centrifuge, strojevi za obradu kože i dr.).

Ovisnost momenta tereta M_t o brzini okretanja radnog mehanizma naziva se *mehaničkom karakteristikom radnog mehanizma*. Ta ovisnost predstavljena je praktičnom formulom:

$$M_t=M_{tr}+\varphi(M_{tn}-M_{tr})\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{\gamma} \qquad \ldots\ldots (6.1)$$

gdje je:

M_{tr} — momenat trenja, M_{tn} — nominalni momenat tereta radnog mehanizma, φ — koeficijent opterećenja, ω — momentalna ugaona brzina okretanja, ω_n — nominalna ugaona brzina okretanja.

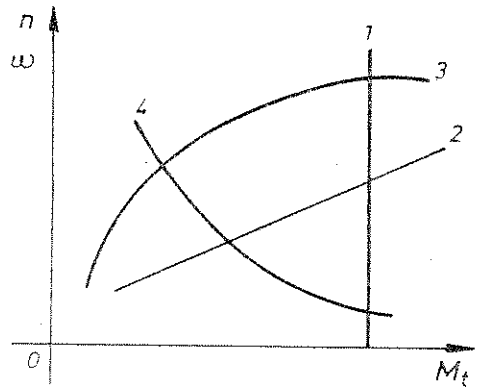
Stepen γ u gornjoj jednačini pokazuje kakav će oblik imati mehanička karakteristika radnog mehanizma.

Na sl. 6.1. prikazane su mehaničke karakteristike različitih radnih mehanizama.

Najčešće susrećemo mehanizme kod kojih je momenat tereta M_t nelinearno ovisan o brzini okretanja ($\gamma=2$) (karakteristika 3, tzv. ventilatorska). Tu spadaju centrifugalne pumpe, kompresori i ventilatori, propulzioni uređaji i dr.

Isto tako, vrlo su česti mehanizmi čiji momenat tereta nastaje uslijed trenja i ne ovisi o brzini okretanja ($\gamma=0$) (karakteristika 1). Tu ubrajamo dizalične mehanizme, transportne uređaje s konstantnim teretom, valjaoničke stanove itd.

Mali je broj mehanizama čiji je momenat tereta linearno ovisan o brzini okretanja ($\gamma=1$) (karakteristika 2). Nešto češće se susrećemo mehanizmi čiji je momenat tereta obrnuto proporcionalan brzini okretanja ($\gamma=-1$) (karakteristika 4).



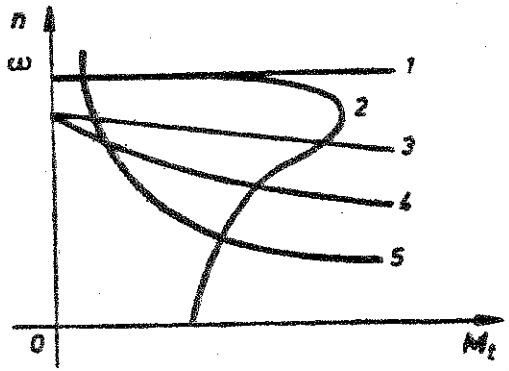
Sl. 6.1. Mehaničke karakteristike radnih mehanizama kod kojih je momenat tereta M_t: *krivulja 1*, neovisan o brzini okretanja $n(\omega)$, *krivulja 2*, linearno ovisan o brzini okretanja, *krivulja 3*, nelinearno ovisan o brzini okretanja i *krivulja 4*, obrnuto proporcionalan brzini okretanja.

6.1.3. **Karakteristične osobine elektromotora**

Koji će motori najbolje odgovarati za elektromotorne pogone utvrđujemo na osnovu njihovih mehaničkih karakteristika, sposobnosti za kočenje kao i drugih osobina koje zavise o vrsti motora, načinu njihovog spajanja, izvedbi itd.

Potrebno je da elektromotor kao veoma važan i aktivan dio elektromotornog pogona osigura najpogodniji rad sistema u stacionarnim i prelaznim stanjima (zaletu, kočenju, promjeni opterećenja i dr.). Kao osnovni kriterij pri izboru vrste motora za radni mehanizam je njegova *mehanička (vanjska) karakteristika*, koja pokazuje ovisnost brzine okretanja o momentu tereta na osovini

motora $n=f(M_t)$ ili $\omega=f(M_t)$. Motor radi na tzv. prirodnoj karakteristici pri nominalnim veličinama. Ukoliko usljed nekih vanjskih uticaja dođe do promjene npr. uslova napajanja, promjene spoja itd., mijenja se mehanička karakteristika motora i ona prelazi iz prirodne u vještačku (izvedenu, podešenu). Većina elektromotora ima padajuću karakteristiku.



Sl. 6.2. Mehaničke karakteristike raznih vrsta motora: 1 — potpuno tvrda karakteristika, 2 i 3 — tvrda karakteristika, 4 i 5 — meka karakteristika.

N. sl. 6.2. prikazane su mehaničke karakteristike raznih vrsta elektromotora.

Potpuno tvrdu mehaničku karakteristiku imaju motori kojima brzina okretanja ostaje stalna pri promjeni opterećenja (momenta tereta) (krivulja 1). Ovakvu karakteristiku imaju sinhroni motori.

Tvrdu mehaničku karakteristiku (krivulje 2 i 3) imaju motori čija se brzina okretanja vrlo malo mijenja s promjenom opterećenja. Tu spadaju istosmjerni paralelni motori, kolektorski naizmjenični paralelni motor i asinhroni motori u području malih vrijednosti klizanja.

Meku mehaničku karakteristiku imaju motori kod kojih se brzina okretanja znatno mijenja s promjenom opterećenja. Takvu prirodnu karakteristiku imaju svi istosmjerni serijski (krivulja 5) i kompaundni (krivulja 4) motori.

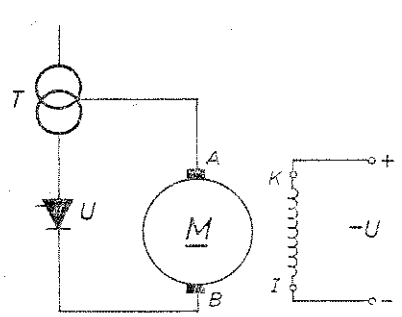
6.1.4. **Sklopovi elektromotornih pogona**

Danas se u mnogim pogonima umjesto jedne mašine upotrebljavaju grupe mašina, sa svrhom poboljšanja rada elektromotornog pogona. Kombinacijama grupa mašina postižu se nove mehaničke karakteristike (povećava se mogućnost upravljanja i regulisanja, npr. pogon grupe motora s krutim spojem osovina), transfiguriraju se električne mreže (priključak ekonomičnih mašina, npr. istosmjernih napajanih preko ispravljača), dobiju se nove pogonske osobine, postiže se ekonomičniji rad itd.

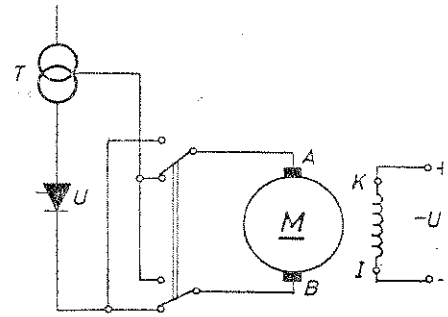
Navešćemo i shematski predstaviti nekoliko karakterističnih sklopova elektromotornih pogona bez šireg objašnjenja.

Istosmjerni nezavisno pobuđeni motor s ispravljačem. U novije vrijeme sve više se primjenjuje ovaj motor. Ispravljači mogu biti živini, tiristorski i drugi. Tiristor je novi i ekonomski značajan element u elektromotornim pogonima. To je upravljački poluprovodnički ventil koji služi za ispravljanje naizmjenične struje u istosmjernu i za regulisanje brzine okretanja motora. Osnovne karakteristike ventilskog elektromotornog pogona (područje regulacije brzine okretanja, mogućnost reverzibilnosti, oblik mehaničke karakteristike, vrsta kočenja itd.)

ovise o shemi spoja između istosmjerne mašine i ispravljača. Na sl. 6.3. prikazan je najjednostavniji spoj koji je pogodan za nereverzibilne pogone i koji nema mogućnosti kočenja. Promjena smjera okretanja istosmjernog motora izvodi se ili promjenom polariteta rotorskog napona ili promjenom smjera pobudne struje.



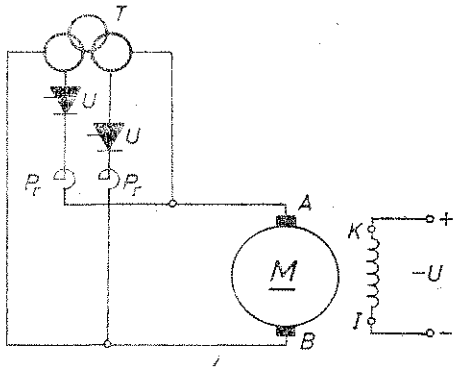
Sl. 6.3. Principijelna shema elektromotornog pogona sa ispravljačem



Sl. 6.4. Shema istosmjernog nezavisno pobuđenog motora s ispravljačem. Reverzibilnost se izvodi prekretanjem napona rotora

Prekretanje rotorskog napona (sl. 6.4) izvodi se preklopnim prekidačem (za motore većih snaga) u momentu kada vrijednost rotorske struje padne na nulu. Kontaktorska tehnika primjenjuje se za motore srednje i manje snage. Prevede li se u tom momentu tiristor u invertor (pretvarač), motor počinje električno da koči, tj. daje energiju mreži, a zatim se počinje ubrzavati u drugom smjeru okretanja pošto se tiristor prevede ponovo u ispravljački režim rada.

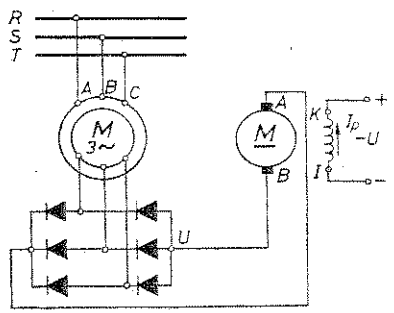
Za česti reverzibilni režim rada nije pogodan prekidač, a posebno ako je smješten u pobudnom kolu motora, pa se zato primjenjuje unakrsni spoj ispravljača, kako je to prikazano na sl. 6.5. Prednost mu je što je spoj beskontaktni, a manja vremena reverzibilnosti brzine okretanja dobijena su dvostrukim grupama tiristora u rotorskom kolu motora. Jedan tiristor radi za jedan smjer okretanja motora, pri čemu je drugi u zapornom režimu rada. Generatorski, koči se prevođenjem zapornog tiristora u invertorski režim. Upravljanje upravljačkom elektrodom omogućava vrlo elastičan rad bez strujnih udara kao i mekano kočenje.



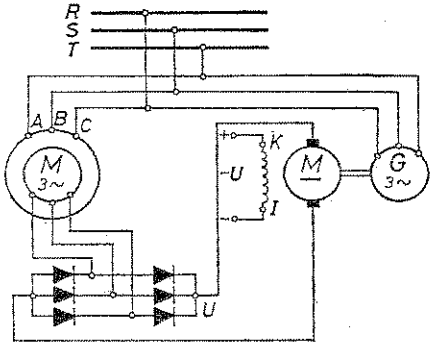
Sl. 6.5. Shema elektromotornog pogona s unakrsnim spojem ispravljača

Ekonomično regulisanje brzine okretanja i reverzibilan rad asinhronog motora s kliznim prstenovima. Poznato nam je da brzinu okretanja ovog motora možemo mijenjati uglavnom neekonomično, tj. uz velike gubitke električne energije u regulacionim otpornicima. Poluprovodnički ispravljači i tiristori omo-

gućavaju ekonimičniju regulaciju brzine okretanja asinhronih motora s kliznim prstenovima na taj način da se naizmjenična struja indukovana u rotoru ispravlja i njome se pogoni motor istosmjerne struje. To je tzv. elektromehanička kaskada, čija je shema predstavljena na sl. 6.6. Umjesto regulacionih otpornika, ovdje je



Sl. 6.6. Shema elektromehaničke kaskade ili kaskade konstantne snage



Sl. 6.7. Shema elektromehaničke kaskade ili kaskade konstantnog momenta

upotrijebljen trofazni ispravljač koji pogoni istosmjerni motor spojen mehanički s rotorom asinhronog motora, pa tako oba motora zajednički pogone stroj za valjaonički stan, veliki ventilator, vazdušnu duvaljku i sl.

Brzinu okretanja elektromehaničke kaskade ekonomično mijenjamo promjenom pobudne struje I_p u pobudnom namotaju istosmjernog motora. Ova kaskada je vrlo pogodna za velike snage, a posebno ako nije potrebno široko područje regulacije brzine okretanja (naniže sve do 20% sinhrone brzine), pri čemu snaga na osovini kaskade ostaje nepromijenjena.

Na sl. 6.7. prikazana je kaskada konstantnog momenta. Ispravljena snaga s kliznih prstenova asinhronog motora predaje se pomoćnom istosmjernom motoru koji pogoni asinhroni generator, a ovaj vraća energiju u mrežu. Brzina okretanja asinhronog motora reguliše se pobudnom strujom pomoćnog istosmjernog motora, pri čemu momenat pogonskog asinhronog motora ostaje stalan. Područje regulacije brzine okretanja kod ove kaskade je šire i ide naniže sve do 50% sinhrone brzine.

6.1.5. **Izbor motora**

Prilikom izbora pogodne vrste motora za elektromotorni pogon koja bi zadovoljila osnovne zahtjeve radnog mehanizma, potrebno je ispravno odabrati osnovne parametre motora. To su: nominalna brzina okretanja, snaga, momenat, priključni napon, itd. Pored toga, na izbor motora utiču puštanje u rad, okolina, ekonomičnost i dr.

Odranije znamo da je momenat motora proporcionalan snazi motora i obrnuto proporcionalan brzini okretanja, dok je snaga proporcionalna indukovanom naponu i struji motora. Dakle:

$$M_m \approx \frac{P}{\omega} \approx \frac{EI}{\omega} \qquad \ldots\ldots (6.2)$$

Uzimajući u obzir zapreminu motora, odnosno veličinu statora i rotora pa prema tome i njegovu masu i cijenu, odabraćemo najmanji, najlakši i najjeftiniji motor za neku potrebnu snagu u elektromotornom pogonu koji će imati što veću nominalnu brzinu okretanja, a uz $P=k\omega M$ imaće najmanji nominalni momenat. Na ovaj način biraju se motori za elektromotorne pogone u stacionarnom stanju, pogotovo što brzohodni motori za istu snagu imaju manje gubitke od sporohodnih. Ako se radi o elektromotornim pogonima s dinamičkim režimom, prilike su nešto drukčije i moramo uzeti u obzir trajanje prelaznih pojava i energetske gubitke.

Određenu ulogu pri izboru motora ima izbor i priključnog napona. On mora biti u granicama koje daju dobro tehnološko i ekonomsko rješenje. Mašinama manje snage odgovara niži, a mašinama veće snage viši priključni napon.

Opšti uslovi okoline elektromotornog pogona, kao što su vlaga, atmosfera, prašina, temperatura okoline, stabilnost podloge itd,. imaju vrlo važnu ulogu pri izboru motora. Različiti propisi o izvedbi motora razlikuju više kategorija motora zaštićenih od pristupa stranih tijela, a posebno vode, od potpuno otvorene do posebno zatvorene izvedbe nepropusne za vodu. Tako se izrađuju motori kod kojih su namotaji zaštićeni od vlage, soli, agresivnih hemijskih para itd. Postoje izvedbe motora koji su otporni na udare i stresove, zatim izvedbe pogodne za rad u atmosferi eksplozivnih zapaljivih plinskih smjesa i para (u hemijskoj industriji, u rudnicima itd.). Pri povišenoj temperaturi okoline ili u slučaju lociranosti elektromotornog pogona na znatno višoj nadmorskoj visini, mora se voditi računa o ispravnom izboru snage, budući da je u pitanju zagrijavanje motora.

Važan kriterij pri izboru motora je i ekonomičnost elektromotornog pogona. Ovdje ćemo uzeti u obzir samo pitanje cijene elektromotora, kao elementa ispravnog izbora elektromotornog pogona. Odmah da kažemo da je trofazni asinhroni kavezni motor tehnički najjednostavniji i najlakši, a prema tome i najjeftiniji. Međutim, asinhroni motor s kliznim prstenovima iste snage i iste izvedbe je nešto teži zbog kliznih prstenova, a još teži je istosmjerni motor zbog kolektora itd. To je posebno izraženo kod mašina male snage.

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta podrazumijevamo pod pojmom elektromotornog pogona i od kojih se elemenata sastoji?
2. Od čega zavisi momenat tereta radnog mehanizma i kako radne mehanizme dijelimo s obzirom na njihovu promjenu?
3. Od čega zavisi mehanička karakteristika radnog mehanizma i šta nam ona pokazuje?
4. Od čega zavisi mehanička karakteristika elektromotora i šta nam ona pokazuje?
5. Šta čini sklop elektromotornog pogona?
6. Nacrtaj elektromehaničku kaskadu i objasni način regulisanja brzine okretanja!
7. Koji su osnovni parametri motora prilikom njegovog izbora za elektromotorni pogon?

6.2. ELEKTRIČNA VUČA

6.2.1. Opšte o električnoj vuči

Primjena električne energije za pogon šinskih i putnih (drumskih) vozila za transport robe i putnika naziva se električna vuča, uz uslov da se pretvaranje električne energije u potrebnu mehaničku energiju za vuču vrši na samom vozilu. Vozila s električnom vučom, prema tome, sadržavaju vučne elektromotore, te se uopšte nazivaju elektromotornim vozilima. Električna vuča se danas primjenjuje gotovo na svim područjima saobraćaja. U radionicama i skladištima upotrebljavaju se akumulatorska kolica, u gradskom saobraćaju tramvaj i trolejbus te podzemna i nadzemna gradska željeznica, elektromobil i žirobus, u rudnicima akumulatorske i trolejlokomotive za manevre na radilištu i za odvoz itd. Konačno, u međugradskom i prigradskom željezničkom saobraćaju u upotrebi su lokomotive koje sadržavaju samo postrojenje za vuču i motorna kola, koja osim postrojenja za vuču imaju i prostor za putnike. Prema tome, električna vuča se primjenjuje na najrazličitijim vozilima, od najmanjih do najvećih snaga. Ona u saobraćaju moraju mijenjati stalno svoju brzinu od pokretanja s mjesta do maksimalne brzine i zaustavljanja, te zato postoji veliki broj tehničkih rješenja, kako za problem prenosa električne energije od njenog izvora do vučnog elektromotora tako i za problem mijenjanja brzine tog motora, pa time i samog vozila.

6.2.2. Podjela električne vuče prema mjestu izvora energije

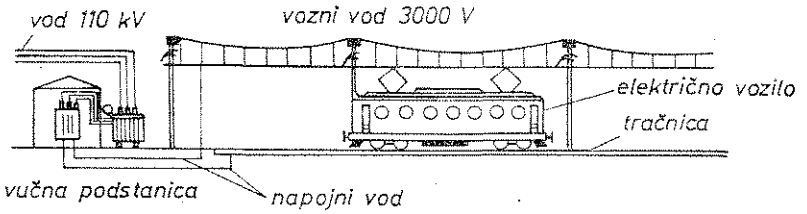
Elektromotorna vozila koriste izvor električne energije na samom vozilu ili iz neke električne mreže. Prema tome, imamo *nezavisna (autonomna) elektromotorna vozila*, koja s akumuliranom energijom mogu izvršiti samo određeni, ograničeni rad, i *zavisna elektromotorna vozila*, koja energiju primaju iz stabilnih elektrana preko kontaktnog (ili voznog) voda i koja praktično raspolažu neograničenom količinom energije.

Nezavisna elektromotorna vozila. Budući da imaju vlastiti izvor energije, moraju se povremeno, npr. na početnoj stanici, napuniti energijom iz izvora energije i to: električnom energijom za punjenje akumulatora, električnom energijom za pogon motora koji će dati ubrzanje zamajcu, hemijskom energijom u obliku goriva itd. Najznačajnija ovakva vozila su: akumulatorska elektromotorna vozila i giro ili žiro-vozila.

Akumulatorska elektromotorna vozila. Njihovi akumulatori se za vrijeme mirovanja vozila (npr. u toku noći) pune električnom energijom koja se troši u toku vožnje. Upotreba im je ograničena relativno velikom masom akumulatorske baterije i njenim relativno kratkim vijekom. Danas se u vučnim vozilima primjenjuju olovni i alkalni akumulatori. Akumulatorska se motorna vozila upotrebljavaju za unutrašnji transport robe u radionicama i pogonima, za putni saobraćaj na kraće udaljenosti, za lokalni i prigradski šinski saobraćaj (akumulatorski šinobusi) kao i za manevar (rudničke lokomotive, manevarke).

Giro- ili žiro-vozila. Kao izvor energije za pogon električnih vučnih motora primjenjuje se kinetička energija rotirajućeg zamajca. U stanicama se vozilo priključuje na izvor električne energije i pomoću ugrađenog asinhronog motora ubrzava se masa zamajca na vozilu. Nakon toga se strujni priključci odvajaju, pa zamajac pomoću akumulirane kinetičke energije pogoni asinhroni motor koji je s njim spojen. Ovaj sada radi kao samopobuđeni asinhroni generator i napaja vučni motor, te tako kočeći zamajac ubrzava vozilo.

Zavisna elektromotorna vozile. Ova vozila primaju električnu energiju iz stabilnih elektrana putem voznog ili kontaktnog voda razapetog duž pruge ili puta kojim se vozilo kreće, kako je to prikazano na sl. 6.8. Trofazna naizmjenična



Sl. 6.8. Principijelna shema napajanja električnom energijom zavisnog elektromotornog vozila

struja visokog napona dovodi se od elektrane do vučne pretvorne stanice, a odatle se istosmjerna struja vodi napojnim vodom do voznog ili kontaktnog voda, dalje preko oduzimača struje kroz pogonske motore električnog vozila i vraća se preko točkova i šina (tračnica) natrag.

Za električnu vuču upotrebljavamo istosmjernu struju različitih napona i naizmjeničnu struju, prvenstveno jednofaznu, također različitih napona s nekoliko frekvencija.

Najčešće se upotrebljavaju istosmjerni naponi od 40, 80, 160 i 400 V za akumulatorska vozila; 250, 500 i 1 200 V za rudnička i industrijska postrojenja za vuču; 600 i 750 V za gradski saobraćaj, a 1 500 i 3 000 V za međugradski željeznički saobraćaj.

Najčešće primjenjivani naizmjenični naponi su: 3 300 V, 16 2/3 Hz jedini trofazni napon na željeznicama u Italiji, koji se također napušta; 600 V i 50 Hz za površinske kopove u Njemačkoj; 11 000 V i 25 Hz u SAD; 15 000 V, 16 2/3 Hz za željeznice u Austriji, Njemačkoj, Norveškcj, Švedskoj i Švicarskoj; 25 000 V, 50 Hz u svim zemljama koje su poslije pedesetih godina počele elektrifikaciju željezničke mreže. Tu spada i Jugoslavija.

6.2.3. Vrsta vozila

Prema podlozi na kojoj se kreću elektromotorna vozila dijelimo na: vozila koja se kreću po šinama (tramvaji i električne lokomotive) ili po putu (trolejbusi).

Po električnim vučnim uređajima i upravljanju su slični i mi ćemo samo pobliže objasniti tramvajska motorna kola.

Motori ovih vozila mogu biti napajani i istosmjernom i naizmjeničnom strujom.

Tramvaji. Tramvajska motorna kola imaju četiri pogonske osovine. Kao pogonski motori služe istosmjerni serijski motori s prirodnim hlađenjem, elastično učvršćenim osovinama okomitim na osovine tramvajskih kola. Upravljanje vratima vrši se pomoćnim elektromotorima.

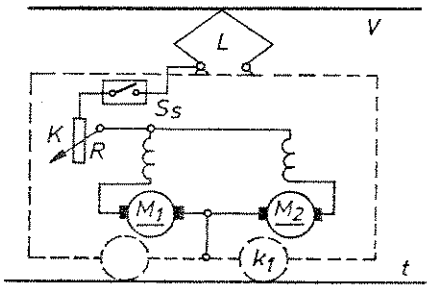
Upotrebljavaju se tri vrste kočnica:

— normalne pogonske električne kočnice s otporničkim kočenjem,

— čeljusne kočnice za osiguranje koje su smještene na osovini vučnih motora, a služe za dodatno kočenje pri malim brzinama i

— elektromagnetne kočnice u slučaju potrebe.

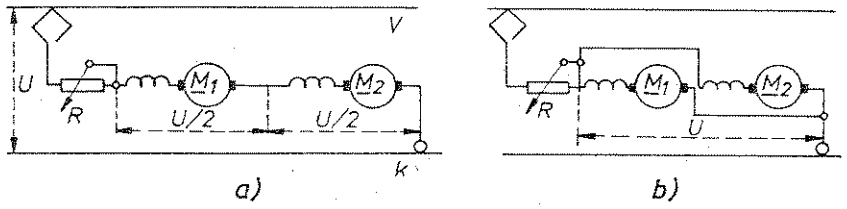
Električni vučni uređaj sastoji se od četiri četveropolna vučna motora s naponom koji je jednak polovini napona mreže, udaljenog od automatskog uklopnog uređaja za pokretanje i električno kočenje.



Sl. 6.9. Shema spoja električnog vučnog vozila (tramvaja) na mrežu istosmjerne struje

Na sl. 6.9. prikazana je shema spoja električnog vučnog vozila (tramvaja) s mrežom istosmjerne struje. Napajanje motornog vozila vrši se direktno istosmjernom strujom iz voznog voda V. Ona imaju dvoosovinsku izvedbu (dva točka K_1 i osovina čine jednoosovinsku izvedbu). Oduzimač struje L (lira ili pantograf) ostvaruje prelaz istosmjerne struje od voznog voda V, koja dalje ide preko sklopke snage S_s do kontrolera K. Sklopka snage djeluje kao nadstrujna zaštita i zaštita od struja kratkog spoja, dok kontroler uključuje i isključuje struju za vučne motore M_1 i M_2. Kontroler koji se sastoji od otpornika R za vožnju prespaja motore iz serijskog u paralelni spoj, zatvara kolo pri elektrodinamičkom kočenju i omogućava promjenu smjera okretanja motora. Struja iz motora teče preko osovine, točkova i šina (tračnica) t i zatvara se opet u izvor struje.

Upravljanje vozilom vrši se prespajanjem vučnih motora. Ako vozilo ima više vučnih motora npr. dva (dvoosovinska vozila), imamo dva načina spajanja motora, i to serijski i paralelni, kako je prikazano na sl. 6.10.

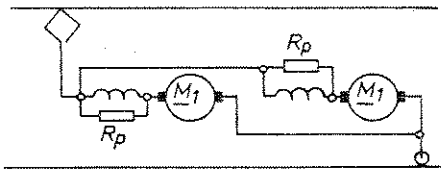


Sl. 6.10. Shematski prikaz načina spajanja motora kod vučnog vozila: a) serijski spoj, b) paralelni spoj.

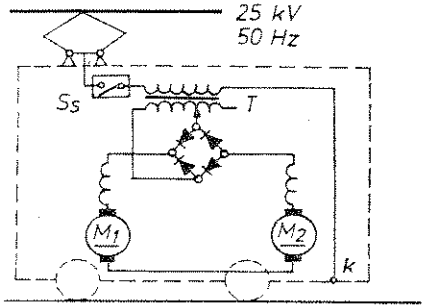
Pri pokretanju vozila motori se najprije nalaze u serijskom spoju (sl. 6.10a), pri čemu na svakom motoru vlada polovina napona mreže $U/2$. Na ovaj način motor ima slabiju struju pokretanja pri očuvanju obrtnog momenta, ali samo polovičnu brzinu okretanja. U seriju spojen otpornik R koji se primjenjuje pri puštanju motora postepeno se isključuje sve do postignute polovične brzine. Nakon toga prespoje se motori u paralelan spoj (sl. 6.10b) i istovremeno ponovo uključi otpornik R. Sada na motorima vlada puni napon mreže, postepeno se smanjuje vrijednost otpora otpornika dok motori ne dostignu punu brzinu okretanja. Time se energija koja se pri pokretanju gubi u otporniku smanjuje približno na polovicu.

Za dobivanje veće brzine okretanja paralelno sa pobudnim namotajem spajamo otpornik R_p, kako je prikazano na sl. 6.11. Povećanjem vrijednosti otpora otpornika smanjuje se pobudna struja, a time se povećava brzina motora.

Pošto vozilo treba često pokretati i zaustavljati, veliki dio energije troši se na otpornicima. Da bismo smanjili utrošak električne energije, vozilom se upravlja pomoću mašine s poprečnim poljem (metadinom) ili pomoću tiristora.



Sl. 6.11. Spajanje otpornika R_p paralelno sa pobudnim namotajem radi dobivanja veće brzine okretanja

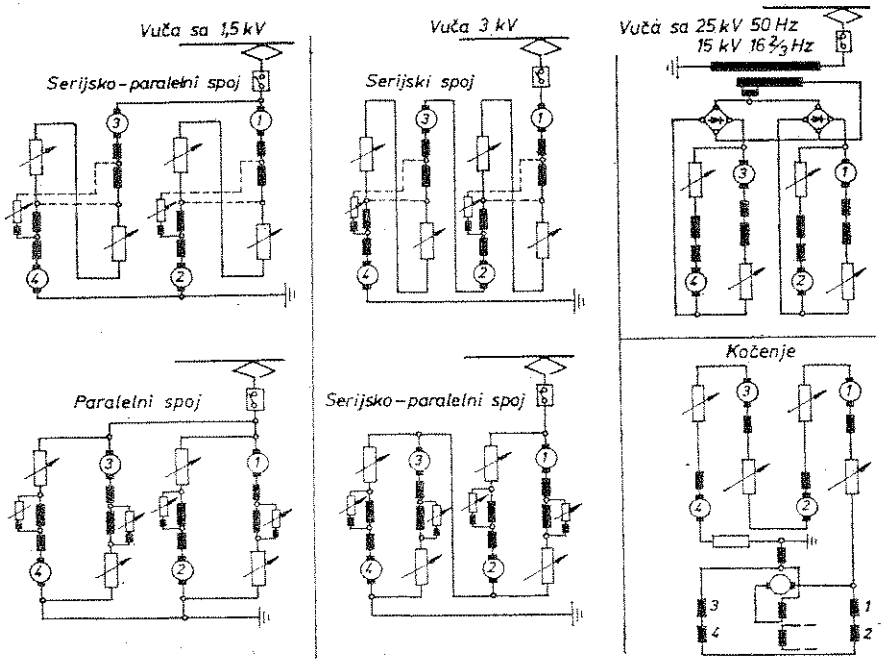


Sl. 6.12. Principijelna shema jednofaznog vozila spojenog na mrežu naizmjenične struje

Vučna vozila za naizmjeničnu struju priključena su preko pantografa na kontaktnu mrežu naizmjeničnog napona. Na ovim se vozilima visoki napon mreže pomoću regulacionog jednofaznog transformatora mijenja u niži radni napon koji odgovara vučnim motorima. Vučni motori ovih vozila priključuju se na pogonski napon ili direktno ili preko ispravljača, pa se zato upotrebljavaju ili motori za jednofaznu struju ili motori za ispravljenu struju. Tu spadaju jednofazni serijski kolektorski vučni motori, koji se uglavnom upotrebljavaju na vozilima za naizmjeničnu struju snižene frekvencije (16 2/3 Hz), a izuzetno za frekvenciju od 50 Hz. Češće se primjenjuju vučni motori za ispravljenu struju, jer objedinjuju prednosti jednofaznih serijskih kolektorskih motora i motora za „čistu" istosmjernu struju, koji nemaju problema komutacije zbog napona transformacije u kratkospojenom svitku. Na sl. 6.12. prikazana je principijelna shema jednofaznog vozila. Pantograf dovodi struju preko sklopke snage S_s na primarni namotaj transformatora T čiji je jedan kraj spojen na donji podstroj vozila u tački k. Na sekundarni namotaj sa izvodima priključen je ispravljač sastavljen od silicijskih dioda u mostnom (Grecovom) spoju. Motori M_1 i M_2 su serijski.

6.2.4. **Sistemi električne vuče kod željeznice**

Imamo četiri glavna sistema elektrifikacije željeznica. To su: istosmjerni sistemi s naponima 1 500 i 3 000 V i naizmjenični sistemi sa 15 kV, 16 2/3 Hz i 25 kV, 50 Hz. Da bi se smanjio broj potrebnih lokomotiva, na međunarodnim linijama (Evropa) se upotrebljavaju 2, 3 i 4-sistemske lokomotive i elektromotorni vozovi koji se mogu uz odgovarajuće prespajanje upotrijebiti za vuču s raznim sistemima. Pri tome može nastati veliki broj kombinacija s obzirom na potrebnu raspoloživu snagu pri pojedinim sistemima. Postoje čak različite širine oduzimača struje (pantografa), tako da lokomotiva za četiri sistema ima obično i četiri različita pantografa.



Sl. 6.13. Principijelne sheme spojeva za vuču i kočenje 4-sistemskih elektromotornih vozova

Na sl. 6.13. prikazane su principijelne sheme spojeva za vuču i kočenje 4-sistemskih elektromotornih vozova. Na ovim se elektromotornim kolima primjenjuju isti četveropolni vučni motori izvedeni za nominalni napon 3 000/2 V i s istim otpornicima za pokretanje za sva četiri evropska sistema elektrifikacije. Pri priključenju na istosmjerne sisteme i pri pokretanju vrši se prespajanje sa serijskog na serijsko-paralelni, odnosno paralelni spoj. Pri tome se mijenja vrijednost otpora otpornika za pokretanje kao i vrijednost pobudne struje šantova. Ako je pogon naizmjeničnom strujom, motori se pogone ispravljenim naponom. Napon vučnih motora reguliše se pri naizmjeničnom napajanju u 12 otpornih stepena i pomoću

15 izvoda na sekundarnom namotaju transformatora. Pri kočenju primjenjuju se isti otpornici kao i za pokretanje, a pobudni namotaji vučnih motora napajaju se iz posebnog motor — generatora.

* * * * * * * * *

PITANJA ZA PROVJERU

1. Šta podrazumijevamo pod pojmom električna vuča i gdje se ona danas primjenjuje?
2. Kako dijelimo električnu vuču prema mjestu izvora energije?
3. Šta spada u nezavisna elektromotorna vozila i gdje se primjenjuju?
4. Koja su to zavisna elektromotorna vozila i kako se napajaju električnom energijom?
5. Nacrtaj shemu spoja električnog vučnog vozila, npr. tramvaja na mrežu istosmjerne struje i objasni način upravljanja!

LITERATURA

1. *A. Dolenc* i *B. Jurković:* KOLEKTORSKI STROJEVI, Zagreb, 1963.
2. *A. Dolenc:* ASINHRONI STROJEVI, Zagreb, 1967.
3. *M. Cvijić:* ELEKTRIČNE MAŠINE, „Znanje", Beograd, 1950.
4. *V. Petrović:* ELEKTRIČNE MAŠINE, Beograd, 1971.
5. *B. Mitraković:* SINHRONE MAŠINE, „Naučna knjiga", Beograd, 1986.
6. *V. Hartl:* ELEKTRIČNI STROJEVI I i II knjiga „Školska knjiga", Zagreb, 1985.
7. *J. Jurković:* ELEKTRIČNI STROJEVI, „Školska knjiga", Zagreb, 1976.
8. *Lj. Stojković:* ELEKTRIČNE MAŠINE I i II knjiga, „Tehnička knjiga", Beograd, 1960.
9. *V. Petrović* i *M. Pendić:* ELEKTRIČNE MAŠINE, Beograd, 1975.
10. *M. Pendić* i *Z. Pendić:* ELEKTRIČNE MAŠINE S OGLEDIMA, Beograd, 1978.
11. *L. M. Piotrovski:* ELEKTRIČNI STROJEVI, „Tehnička knjiga", Zagreb, 1985.
12. *M. Livšic:* ELEKTRIČNE MAŠINE I, II i III knjiga, Beograd, 1950.
13. *G. N. Petrov:* ELEKTRIČNI STROJEVI II, ASINHRONI STROJEVI, Zagreb, 1950,
14. *K. Likavec:* ELEKTRIČNE MAŠINE, Beograd, 1949.
15. *M. I. Kuznecov:* OSNOVI ELEKTROTEHNIKI, Moskva, 1970.
16. *V. Moroz:* MASZYNY ELEKTRYCZNE, Warszawa, 1969.
17. *L. Kacejko:* PRACOWNIA ELEKTROTECHNICZNA, Warszawa, 1962.
18. *R. Lisaček* i *J. Veselý:* VYROBNI PRAXE, Praha, 1969.
19. *E. Židovec* i *J. Singer:* ELEKTROTEHNIČKI STROJEVI 1 i 2 radni listovi, Zagreb, 1980.
20. *J. Singer:* ELEKTROTEHNIČKI PRAKTIČAR, Zagreb, 1986.
21. *N. Srb:* ELEKTROMOTORI, „Tehnička knjiga" Zagreb, 1978.
22. *J. Polak* i *N. Srb:* IZOLACIJSKI MATERIJALI ROTACIONIH STROJEVA, Zagreb, 1988.
23. *V. Ralčovski:* PREMATANJE ASINHRONIH MOTORA, Zagreb, 1978
24. *Z. Vistrička* i *I. Uremović:* SHEME SPAJANJA U ELEKTROTEHNICI I i II knjiga, Zagreb, 1981.
25. *F. Mlakar:* OPĆA ELEKTRIČNA MJERENJA, Ljubljana, 1975.
26. *H. Meluzin:* ELEKTROTEHNIKA, „Tehnička knjiga" Zagreb, 1982.
27. *Jugoslovenski leksikografski zavod:* TEHNIČKA ENCIKLOPEDIJA, 3, 4 i 5 tom.
28. *Jugoslovenski leksikografski zavod:* OPĆA ENCIKLOPEDIJA.
29. *Prospektni materijali:* „ELEKTROKOVINA", Maribor, 1988.
: „RADE KONČAR", Zagreb, 1988.
: „SEVER", Subotica, 1988.